



# “物联网在中国”系列丛书 编委会名单

## “物联网在中国”系列丛书专家顾问委员会

主 任：潘云鹤

副主任：邬贺铨 刘韵洁

委 员：李国杰 何积丰 陈左宁 方滨兴 邓中翰 张文军  
朱洪波 郑立荣 熊群力 芮晓武 姜文波

## “物联网在中国”系列丛书编写委员会

主 任：张 琪

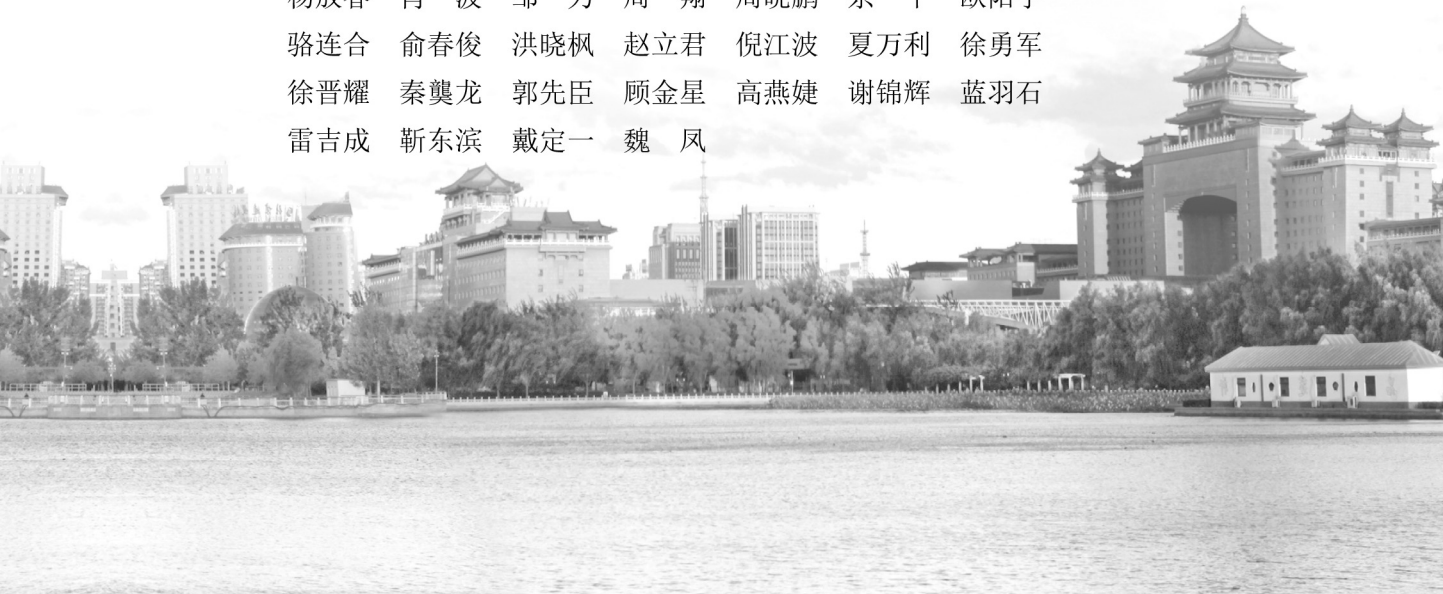
副主任：敖 然 刘爱民

主 编：潘云鹤

副主编：邬贺铨 刘韵洁

委 员：（以下按姓氏笔画排序）：

马 彦	王 智	王 毅	王立健	王营冠	叶甜春	刘 星
刘风军	刘建明	刘宪兰	刘海涛	刘烈宏	毕开春	许罗德
何 明	吴 巍	吴亚林	吴建平	吴振锋	吴曼青	张 晖
张为民	张学庆	张海霞	李安民	李作敏	李海峰	杨志强
杨放春	肖 波	邹 力	周 翔	周晓鹏	宗 平	欧阳宇
骆连合	俞春俊	洪晓枫	赵立君	倪江波	夏万利	徐勇军
徐晋耀	秦龔龙	郭先臣	顾金星	高燕婕	谢锦辉	蓝羽石
雷吉成	靳东滨	戴定一	魏 凤			



物联网在中国

“十二五”国家重点图书出版规划项目

国家出版基金项目

# 无线传感器网络军事应用

吴振锋 蒋 飞 刘兴川 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

无线传感器网络,已发展成为影响未来人类生活的重大新兴技术之一。本书立足军事应用需求和信息技术推动,结合无线传感器网络的最新发展现状和技术趋势,成体系地对无线传感器网络的军事应用进行了分析和介绍,构建了无线传感器网络军事应用体系架构和技术架构,提出了无线传感器网络军事应用的关键技术,给出了多个军事领域的应用实例,初步形成了无线传感器网络军事应用理论体系。

全书共9章,重点描述了无线传感器网络军事应用的概念、内涵、现状、趋势、需求、模式、架构、技术、实例和展望等内容,是作者结合多年来无线传感器网络领域理论研究基础和实际工程经验,持续跟踪国内外无线传感器网络的应用发展,深入分析研究而形成的成果。

本书可以作为从事无线传感器网络军事应用领域工作相关人员、高等院校相关专业本科生和研究生的参考书籍,也可以作为广大国防信息化爱好者的普及读物。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络军事应用 / 吴振锋, 蒋飞, 刘兴川编著. —北京: 电子工业出版社, 2015.7  
(物联网在中国)

ISBN 978-7-121-26534-1

I. ①无… II. ①吴… ②蒋… ③刘… III. ①无线电通信—传感器—军事应用 IV. ①E919

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 149010 号

策划编辑: 刘宪兰

责任编辑: 徐蔷薇 特约编辑: 刘宪兰

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 26.25 字数: 558 千字

版 次: 2015 年 7 月第 1 版

印 次: 2015 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 2 000 册 定价: 92.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

信息技术的高速发展与广泛应用，引发了一场全球性的产业革命，正推动着各国经济的发展与人类社会的进步。信息化是当今世界经济和社会发展的的大趋势，信息化水平已成为衡量一个国家综合国力与现代化水平的重要标志。中国政府高度重视信息化工作，紧紧抓住全球信息技术革命和信息化发展的难得历史机遇，不失时机地将信息化建设提到国家战略高度，大力推进国民经济与社会服务的信息化，以加快实现我国工业化和现代化，并将信息产业作为国家的先导、支柱与战略性新兴产业，放在优先发展的地位上。

党的十五届五中全会明确指出：信息化是覆盖现代化建设全局的战略举措；要优先发展信息产业，大力推广信息技术应用。党的“十六大”把大力推进信息化作为我国在 21 世纪头 20 年经济建设和改革的一项重要任务，明确要求“坚持以信息化带动工业化，以工业化促进信息化”，“走新型工业化道路”。党的“十七大”进一步提出了“五化并举”与“两化融合发展”的目标，再次强调了走新型工业化道路，大力推广信息技术应用与推动国家信息化建设的战略方针。在中央领导的亲切关怀、指导，各部门、各地方及各界的积极参与和共同努力下，我国的信息产业持续高速发展，信息技术应用与信息化建设坚持“以人为本”、科学发展，取得了利国惠民、举世瞩目的骄人业绩。

近几年来，在全球金融危机的大背景下，各国政要纷纷以政治家的胆略和战略思维提出了振兴本国经济、确立竞争优势的关键战略。2009 年，美国奥巴马政府把“智慧地球”上升为国家战略；欧盟也在同年推出《欧洲物联网行动计划》；我国领导人在 2009 年提出了“感知中国”的理念，并于 2010 年把包含物联网在内的新一代信息技术等 7 个重点产业，列入“国务院加快培育和发展的战略性新兴产业的决定”中，同时纳入我国“十二五”重点发展战略及规划。日本在 2009 年颁布了新一代信息化战略“i-Japan”；韩国 2006 年提出“u-Korea”战略，2009 年具体推出 IT839 战略以呼应“u-Korea”战略；澳大利亚推出了基于智慧城市和智能电网的国家发展战略；此外，“数字英国”、“数字法国”、“新加坡智慧国 2015 (iN2015)”等，这些从国家角度提出的重大信息化发展目标，将作为各国走出金融危机、重振经济的重要战略举措。

物联网在中国的迅速兴起绝非炒作，我们认为它是我国战略性新兴产业——信息产业创新发展的新的增长点，是中国信息化重大工程，特别是国家金卡工程最近 10 年的创新应用、大胆探索与成功实践所奠定的市场与应用基础，是中国信息化建设在更高层次，

向更广领域纵深发展的必然结果。

前些年来，胡锦涛总书记等中央领导同志深入基层调研，多次强调要依靠科技创新引领经济社会发展，要注重经济结构调整和发展模式转变，重视和支持战略性新兴产业发展，并对建设“感知中国”、积极发展物联网应用等做出明确指示。中央领导在视察过程中，充分肯定了国家金卡工程银行卡产业发展及城市多功能卡应用和物联网 RFID 行业应用示范工程取得的成果，鼓励我国信息业界加强对超高频 UHF 等核心芯片的研发，并就推动物联网产业和应用发展等问题发表了重要讲话，就加快标准制定、核心技术产品研发、抢占科技制高点、掌握发展主动权等，做出一系列重要指示。我们将全面贯彻落实中央领导的指示精神，进一步发挥信息产业对国家经济增长的“倍增器”、发展方式的“转换器”和产业升级的“助推器”作用，促进两化融合发展，真正走出一条具有中国特色的信息产业发展与国家信息化之路。

我们编辑出版“物联网在中国”系列丛书（以下简称“丛书”），旨在探索中国特色的物联网发展之路，通过全面介绍中国物联网的发展背景、体系架构、技术标准体系、关键核心技术产品与产业体系、典型应用系统及重点领域、公共服务平台及服务业发展等，为各级政府部门、广大用户及信息业界提供决策参考和工作指南，以推动物联网产业与应用在中国的健康有序发展。

对于“丛书”的正式发行，我们衷心感谢国家新闻出版广电总局的大力支持，将“丛书”列入“十二五”国家重点图书出版规划项目，并给予国家出版基金的支持；感谢国务院各相关部门、行业及有关地方，以及我国信息产业界相关企事业单位对“丛书”编写工作的指导、支持和积极参与；感谢社会各界朋友的支持与帮助。谨以此“丛书”献给为中国的信息化事业奋力拼搏的人们！

“物联网在中国”系列丛书编委会

潘雲鵬

2011 年 5 月于北京

无线传感器网络拥有广阔的应用前景，近年来引起了国际上多个国家的高度重视，现已发展成为当前国际上备受关注的、多学科交叉的一个前沿研究热点。特别是在军事领域，无线传感器网络可在恶劣环境下近距离隐蔽式实现战场感知，为信息化战争带来新的电子眼和电子耳，正成为信息化战场的宠儿。本书立足军事应用需求，结合无线传感器网络最新研究现状和技术发展趋势，系统、全面地对无线传感器网络的概念内涵、军事应用理论、关键技术以及典型军事应用实例进行详细阐述，初步形成了无线传感器网络军事应用理论体系，以推动无线传感器网络军事应用向更高层面、更广领域纵深发展做出应用的贡献。全书分为 9 章，具体安排如下。

第 1 章为绪论，讨论了无线传感器网络的概念内涵，简要描述了无线传感器网络的特征、体系架构和关键技术；分析了无线传感器网络军事应用现状，介绍了近年来世界军事强国实施的典型军事应用项目，总结了目前无线传感器网络军事应用所呈现的特点；并结合应用现状，阐述了无线传感器网络军事应用的趋势。

第 2 章为无线传感器网络军事应用理论。该章全面梳理和分析了无线传感器网络在战场感知、武器装备和后勤保障等领域的军事应用需求；研究提出了无线传感器网络情报侦察模式、自主反应模式和传感器网络战模式；从传感器节点架构、网络架构、协议栈架构以及体系架构设计准则四个方面，阐述了无线传感器网络军事应用体系架构；最后，结合技术发展和技术实现，提出了无线传感器网络军事应用技术架构。

第 3 章为无线传感器网络物理感知技术，重点介绍了传感器的分类、特性和校准等；同时，以传统传感器技术和新型传感器技术为典型，系统地介绍了各类传感器的工作原理、特点、性能和应用状况等；并结合军事应用的特点，详细介绍了军用传感器的作用、典型军用传感器的性能、军用传感器关键技术以及军用传感器的应用情况。

第 4 章为无线传感器网络通信传输技术，其以数据链路层、网络层和传输层协议为核心，结合军事应用特点，系统地分析了无线传感器网络通信传输技术。在数据链路层，重点介绍了竞争型、分配型和混合型 MAC 协议；在网络层，重点介绍了以数据为中心、地理位置信息、基于服务质量以及分层路由协议；在传输层，重点介绍了拥塞控制、可靠传输以及混合传输协议。

第 5 章为无线传感器网络应用支撑技术。该章结合无线传感器网络应用驱动性的特点，

全面分析了数据融合、协同监控、编码传输和大数据等无线传感器网络应用支撑技术，系统地介绍了数据融合架构和实现方法，设计了无线唤醒、联动探测、协同调度和目标跟踪等协同监控机制，提出了分布式编码框架和实现方案，分析了大数据处理框架和关键技术。

第 6 章为无线传感器网络管理技术，重点介绍了无线传感器网络走向实用化的关键技术——拓扑控制、时间同步、节点定位和管控等网络管理技术，为网络拓扑有效性构建、节点时钟一致性、节点和目标精确定位以及网络高效管控提供了解决方案和方法。

第 7 章为无线传感器网络安全技术，阐述了无线传感器网络安全需求与面临的挑战；深入研究和总结了无线传感器网络军事应用中物理层、链路层、网络层和传输层所面临的安全威胁；针对各类安全威胁，设计了无线传感器网络安全框架，并结合军事应用提出加密技术、密钥管理、安全服务和入侵检测等安全技术，以保证军事应用中数据的采集和传输，及至节点物理分布的安全和保密。

第 8 章为无线传感器网络军事应用实例，包括战场态势感知、目标定位跟踪、单兵系统、目标防护等多个具体军事领域的典型军事应用案例，研究分析了在各领域无线传感器网络军事应用的机理、流程和方法，提出了未来应用思路 and 模式，并以重要目标防护作为具体开发实例，详细阐述了无线传感器网络军事应用工程化思路、方法和过程。

第 9 章为建议和展望，从宏观战略和技术发展两个层面对无线传感器网络军事应用提出发展建议；同时，结合技术发展趋势和美军最新的应用探索，对未来无线传感器网络军事应用进行了展望；并从未来技术实现与应用角度，分析和总结了无线传感器网络在军事领域应用中亟需重点关注的问题。

本书由中国电子科技集团公司第二十八研究所多位长期从事国防信息建设和无线传感器网络军事应用研究的科技人员主笔完成。在全书编写过程中，贲伟、秦晷、许建、刘超、王辉、李毅、李伟超、任志宏和张铭等同志提供了多年的科研成果作为参考并拟制相关内容，协助绘制了大量精美图片，以及对书稿进行了认真校阅，提出了许多宝贵意见和建议。在此，向所有为本书的写作和出版做出贡献的领导、专家和同志表示最衷心的感谢！

在编写过程中，作者参阅了大量详实的文献资料，同时融入了多年在军事信息化建设方面的理论积累和实践经验，但是由于无线传感器网络军事应用尚处于探索和发展阶段，同时受时间、作者水平所限，书中难免会存在不足和纰漏之处，敬请广大读者朋友批评斧正。

作 者  
2015 年 1 月



# CONTENTS

## 目录

第 1 章 绪论	1
1.1 无线传感器网络的概念内涵	2
1.1.1 无线传感器网络的概念	2
1.1.2 无线传感器网络特征	3
1.1.3 无线传感器网络体系架构	4
1.1.4 无线传感器网络关键技术	7
1.2 无线传感器网络军事应用现状	10
1.2.1 国外应用现状	11
1.2.2 国内应用现状	14
1.2.3 应用现状总结	15
1.3 无线传感器网络军事应用的趋势	17
第 2 章 无线传感器网络军事应用理论	21
2.1 无线传感器网络军事应用需求	22
2.1.1 战场感知领域应用需求	24
2.1.2 武器装备领域应用需求	26
2.1.3 后勤保障领域应用需求	28
2.2 无线传感器网络军事应用模式	29
2.2.1 情报侦察应用模式	31
2.2.2 自主反应模式	32
2.2.3 传感器网络战模式	35
2.3 无线传感器网络军事应用体系架构	36
2.3.1 传感器节点架构	36
2.3.2 网络架构	38
2.3.3 协议栈架构	42
2.3.4 体系架构的设计准则	43
2.4 无线传感器网络军事应用技术架构	44
第 3 章 无线传感器网络物理感知技术	49
3.1 概述	50
3.1.1 传感器定义	50

3.1.2	传感器分类	50
3.1.3	传感器特性	54
3.1.4	传感器校准	62
3.1.5	传感器发展趋势	63
3.2	传统传感器技术	65
3.2.1	电阻式传感器技术	66
3.2.2	电容式传感器技术	67
3.2.3	磁电式传感器技术	69
3.2.4	热电式传感器技术	70
3.2.5	谐振式传感器技术	70
3.2.6	气敏式传感器技术	71
3.3	新型传感器技术	71
3.3.1	MEMS 传感器技术	72
3.3.2	数字传感器技术	73
3.3.3	集成传感器技术	74
3.3.4	多功能传感器技术	75
3.3.5	模糊传感器技术	77
3.3.6	网络传感器技术	79
3.3.7	模型传感器技术	81
3.3.8	智能传感器技术	83
3.3.9	图像传感器技术	86
3.4	军用传感器技术	88
3.4.1	军用传感器的作用和要求	88
3.4.2	典型军用传感器	91
3.4.3	军用传感器关键技术	93
3.4.4	军用传感器应用情况	94
第 4 章	无线传感器网络通信传输技术	97
4.1	概述	98
4.2	数据链路协议	98
4.2.1	MAC 协议的特点及分类	98
4.2.2	竞争型 MAC 协议	101
4.2.3	分配型 MAC 协议	111
4.2.4	混合型 MAC 协议	118
4.3	网络协议	124
4.3.1	路由协议特点及分类	124
4.3.2	以数据为中心的路由协议	127
4.3.3	分层路由协议	131
4.3.4	地理位置信息路由协议	134

4.3.5	基于服务质量的路由协议 .....	137
4.4	传输协议 .....	140
4.4.1	传输协议的特点及分类 .....	140
4.4.2	拥塞控制协议 .....	141
4.4.3	可靠传输协议 .....	144
4.4.4	混合协议 .....	146
<b>第 5 章</b>	<b>无线传感器网络应用支撑技术 .....</b>	<b>149</b>
5.1	数据融合技术 .....	150
5.1.1	数据融合的定义 .....	150
5.1.2	数据融合的作用 .....	150
5.1.3	数据融合的分类 .....	151
5.1.4	数据融合的架构 .....	155
5.1.5	数据融合的方法 .....	158
5.2	协同监控技术 .....	166
5.2.1	无线唤醒技术 .....	166
5.2.2	联动探测技术 .....	179
5.2.3	协同调度技术 .....	190
5.2.4	目标跟踪技术 .....	199
5.3	编码传输技术 .....	211
5.3.1	编码传输技术的基本概念 .....	211
5.3.2	分布式编码基础理论 .....	214
5.3.3	分布式编码实现技术 .....	216
5.4	大数据技术 .....	239
5.4.1	大数据的基本概念 .....	239
5.4.2	大数据处理框架 .....	240
5.4.3	大数据关键技术 .....	244
<b>第 6 章</b>	<b>无线传感器网络管理技术 .....</b>	<b>251</b>
6.1	拓扑控制技术 .....	252
6.1.1	拓扑控制特点及分类 .....	252
6.1.2	功率型拓扑控制 .....	253
6.1.3	层次型拓扑控制 .....	257
6.1.4	启发式拓扑控制 .....	261
6.1.5	混合型拓扑控制 .....	264
6.2	时间同步技术 .....	266
6.2.1	时间同步技术的特点及分类 .....	267
6.2.2	接收者—接收者时间同步算法 .....	269
6.2.3	发送者—接收者双向时间同步算法 .....	272

6.2.4	发送者—接收者单向时间同步算法	274
6.3	节点定位技术	275
6.3.1	节点定位特点及分类	275
6.3.2	基于距离的定位算法	277
6.3.3	距离无关的定位算法	281
6.4	管理控制技术	285
6.4.1	管控技术的特点及分类	286
6.4.2	网络管控技术	287
6.4.3	节点能耗管控技术	290
6.4.4	探测行为管控技术	292
<b>第 7 章</b>	<b>无线传感器网络安全技术</b>	<b>297</b>
7.1	概述	298
7.1.1	安全需求与内容	298
7.1.2	安全面临的挑战	300
7.2	安全威胁分析	301
7.2.1	物理层安全威胁	301
7.2.2	链路层安全威胁	302
7.2.3	网络层安全威胁	303
7.2.4	传输层安全威胁	304
7.3	典型安全技术分析	305
7.3.1	安全框架	305
7.3.2	加密技术	308
7.3.3	密钥管理	312
7.3.4	安全服务	314
7.3.5	入侵检测技术	318
<b>第 8 章</b>	<b>无线传感器网络军事应用实例</b>	<b>323</b>
8.1	概述	324
8.2	战场态势感知应用实例	325
8.2.1	智能微尘	326
8.2.2	灵巧传感器网络	330
8.3	目标定位跟踪应用实例	332
8.3.1	枪声定位系统	335
8.3.2	战场目标定位跟踪系统	340
8.4	单兵系统应用实例	343
8.4.1	单兵作战系统	344
8.4.2	单兵生命体征监测系统	347
8.5	其他领域应用实例	352

8.5.1	智能武器 .....	352
8.5.2	军事训练 .....	356
8.5.3	目标毁伤效果评估 .....	359
8.6	重要目标防护开发实例 .....	361
8.6.1	应用背景 .....	361
8.6.2	无线传感器网络的节点设计 .....	362
8.6.3	重要目标防护原型系统 .....	370
<b>第 9 章</b>	<b>建议与展望 .....</b>	<b>381</b>
9.1	无线传感器网络军事应用的建议 .....	382
9.2	无线传感器网络军事应用展望 .....	385
9.3	无线传感器网络军事应用的问题 .....	387
<b>附录 A</b>	<b>缩略语对照表 .....</b>	<b>391</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>397</b>



# 第1章

## 绪论



无线传感器网络的出现源自于强烈的应用需求，其概念一经推出，立即在各行各业得到广泛应用。特别是无线传感器网络在军事领域的应用已经逐步铺开，世界各国尤其是世界军事强国已经实施了大量的具体无线传感器网络项目，取得不少的成果，但甚少能有意识地站在理论高度去推动无线传感器网络军事应用领域的发展，也使得人们对此有了更多的期待。本章将从无线传感器网络的概念内涵出发，分析无线传感器网络军事应用的现状，介绍典型军事应用项目，总结无线传感器网络军事应用的特点和趋势，以便读者对无线传感器网络军事应用形成基本的认识。



## 1.1 无线传感器网络的概念内涵

无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）是集信息采集、信息传输和信息处理于一体的综合智能网络信息系统。这种网络信息系统能够实时感知与采集指定区域内的各种环境数据和目标信息，并将所感知和采集到的数据和信息传送到监控中心或终端用户，实现对物理世界的感知、人与物理世界之间的通信和信息交互，在军事和民用领域有着十分广阔的应用前景。无线传感器网络是继 Internet 之后，对 21 世纪人类生活方式产生重大影响的 IT 技术之一，它涉及微电子、网络通信和嵌入式计算等主要技术，是当前国际上备受关注的、多学科交叉的前沿热点研究领域。

### 1.1.1 无线传感器网络的概念

目前，无线传感器网络的概念并不统一，本书对国内外比较流行的无线传感器网络概念进行归纳整理。

概念一：无线传感器网络是由若干具有无线通信能力的传感器节点自组织构成的网络。这个概念起源于 1978 年美国国防部高级研究计划局资助卡耐基-梅隆大学进行分布式传感器网络的研究项目，由美国军方首次提出。由于时间久远，当时并没有考虑互联网及智能计算等技术的支持，强调无线传感器网络是由节点组成的小规模自组织网络。

概念二：泛在无线传感器网络（Ubiquitous Sensor Network, USN）是由智能传感器节点组成的网络，可以以“任何地点、任何时间、任何人、任何物”的形式被部署。该技术具有巨大的发展潜力，能够推动新的应用和服务，涉及安全保卫、环境监测到推动个人生产力和增强国家竞争力等领域。此定义由 ITU-T 在 2008 年 2 月的研究报告 Ubiquitous Sensor Network 中提出，该概念强调任何时间、任何地点、任何人和任何物的互联。

概念三：无线传感器网络是以对物理世界的数据采集和信息处理为主要任务，以网络为信息传递载体，实现物与物、物与人之间的信息交互，提供信息服务的智能网络信息系统。此定义由中国信息技术委员会所属传感器网络标准工作组在 2009 年 9 月的工作文件中提出，该概念具体表现为：它综合了微传感器、分布式信号处理、无线通信网络和嵌入式计算等多种先进信息技术，能够对物理世界进行信息采集、传输和处理，并将处理结果以服务形式发布给用户。该概念重点强调网络化信息系统。国内传感器网络标准化工作组关于无线传感器网络的最新定义为：无线传感器网络是利用传感器节点及其他网络基础设施，对物理世界进行信息采集并对采集的信息进行传输和处理，以及为用户提供服务的网络化信息系统。

概念四：无线传感器网络是以感知为目的，实现人与人、人与物、物与物全面互联



的网络。其突出特征是通过传感器等方式获取物理世界的各种信息，结合互联网、移动通信网等进行信息的传送与交互，采用智能技术对信息进行分析处理，从而提升对物质世界的感知能力，实现智能化的决策和控制。此定义出自工业和信息化部、江苏省联合向国务院上报的《关于支持无锡建设国家传感网创新示范区（国家传感信息中心）情况的报告》。该概念更侧重于物联网，突出感知地位，强调智能化的决策和控制。

这些概念基本上是国内外相对比较权威的概念，尽管存在一定的差异，但基本上反应了无线传感器网络概念的发展历程。总体来看，与很多新兴的概念一样，目前有关无线传感器网络的概念主要归结为狭义和广义两类。狭义的无线传感器网络概念，类似概念一，更多地强调传感器节点以及传感器节点的互连；广义的无线传感器网络概念则在狭义概念基础上，加入网络化、服务化、智能化等新技术和新理念，进一步深化发展，类似其他三个概念，强调建立在广泛互连基础上的网络智能处理与应用。本书综合分析这四个概念，既兼顾无线传感器网络初始含义，也要满足无线传感器网络的未来发展需求，给出一种当前阶段下的无线传感器网络的概念：无线传感器网络是由部署在监测区域内大量传感器节点，通过无线通信方式形成的自组织网络，其目的是协作地采集、传输和处理网络覆盖区域中被感知对象的各类信息。

相比无线传感器网络概念上的不统一，对有关无线传感器网络的特征、体系架构、关键技术已经形成一定的共识，并被普遍接受。下面将对无线传感器网络的特征、体系架构和关键技术作出简要说明。

### 1.1.2 无线传感器网络特征

无线传感器网络将能源高效使用作为首要设计目标，以数据为中心，专注于从外界获取有效信息，无线传感器网络具有以下六种典型特征。

#### 1. 规模性

为了获取精确信息，在监测区域通常部署成千上万个传感器节点。无线传感器网络的大规模特性有两个方面的含义：一方面是传感器节点分布的范围大，如森林中需要大范围部署传感器节点进行森林防火和环境监测；另一方面，传感器节点的部署密度高，即在小空间范围内，密集地部署了数量很多的传感器节点。大规模和冗余的传感器节点间的协同交互工作可有效提高系统的可靠性和工作质量。

#### 2. 自组织

无线传感器网络不存在绝对的控制中心，所有传感器节点的地位都是平等的，由于经常被放置到人不可到达或危险的区域，因此要求传感器节点具有自组织能力，可以通过拓扑控制机制来协调彼此的行为。此外，由于传感器节点能量耗尽或环境因素造成的

网络拓扑动态变化，这种网络拓扑结构的动态变化要求无线传感器网络具有自组织性。

### 3. 动态性

无线传感器网络的拓扑结构可能因为多种因素而发生变化，如环境或能量因素造成的传感器节点出现故障或失效；环境条件变化造成无线通信链路带宽变化；无线传感器网络的传感器节点、感知对象和观察者这三要素都可能具有移动性；新节点的加入等。这均要求无线传感器网络要能适应动态网络环境的变化，并且具有动态的系统可重构性。

### 4. 安全性和可靠性

无线传感器网络节点往往通过随机抛撒的方式部署在恶劣和无人的环境中，这就要求传感器节点非常坚固，可以适应各种恶劣环境。同时，由于监测区域环境的限制，网络的维护十分困难，无线传感器网络的安全性和可靠性也显得十分重要。因此，无线传感器网络在软/硬件的设计上必须要有较高的鲁棒性和容错性。

### 5. 有限性

无线传感器网络的有限性主要是指无线传感器网络节点的能量供给有限以及通信带宽有限。无线传感器网络的节点往往布置在环境恶劣的野外，节点本身的能量有限，每个节点只能依靠自带或自主获取的能源（电池或通过太阳能）供电。由此导致的能源受限是阻碍无线传感器网络发展及应用的主要障碍之一。此外，无线传感器网络采用无线传输技术作为底层通信手段，由于无线信道本身的物理特性，它所能提供的网络带宽相对有线信道要低得多，由于信道竞争和信号衰减等原因，终端节点得到的实际带宽远远小于理论上的最大带宽。

### 6. 以数据为中心

无线传感器网络是任务型网络，传感器节点采用节点编号标示，由于节点随机部署，构成的无线传感器网络与节点编号之间的关系是动态的，表现为节点编号和节点位置没有必然的联系。用户应用无线传感器网络时，与网络的具体工作机制相比，用户更为关心的是无线传感器网络所感知的目标数据，以及融合处理后所得到的有用信息。

## 1.1.3 无线传感器网络体系架构

无线传感器网络通信结构的典型形式如图 1-1 所示。在无线传感器网络中，传感器节点任意散落在被监测区域内，除了感测特定的对象，还进行简单的计算并维持互相之间的网络连接。无线传感器网络具有自组织的功能，单个传感器节点经过初始的通信和协商，形成一个传输信息的多跳网络。每个无线传感器网络配备有一个连接到外部网络的汇聚节点/网关，很多情况下无线传感器网络中的汇聚节点直接承担了网关的功能，二

者合二为一。汇聚节点/网关主要通过多种方式（如以太网、WiFi 等）与外界进行数据交互，负责连接无线传感器网络与其他外部网络（如 Internet 等）。汇聚节点/网关将感测数据由被监测区域发送到 Internet，然后连接到远程数据库，最后经过具体的分析处理，为终端用户提供服务。

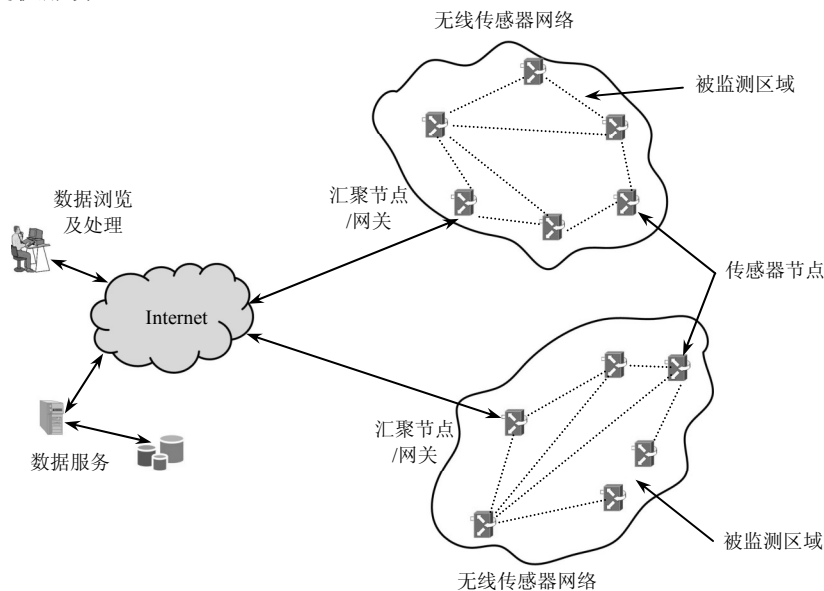


图 1-1 无线传感器网络通信结构的典型形式

无线传感器网络的拓扑结构一般可以分为星状网络、网状网络及星-网混合网络三种。每种拓扑结构都有自身的优点和缺点，可以根据具体的应用要求，选择不同的无线传感器网络拓扑结构。

星状网络拓扑结构一般是单跳系统，网络中所有无线传感器节点都与汇聚节点或网关进行双向通信，如图 1-2（a）所示。物理形式上，网络可以是一台 PC、PDA、嵌入式网络服务器。网关除了向各节点传输数据和命令外，还可以与 Internet 外部网络进行传输数据。各节点将汇聚节点/网关作为一个中间点，相互之间并不传输数据或命令。在各种无线传感器网络中，星状网络整体功耗最低，但节点与汇聚节点/网关间的传输距离有限，一般只有几十米。

网状网络拓扑结构是多跳系统，其中所有无线传感器节点都相同，而且直接互相通信，如图 1-2（b）所示。网状网络的每个传感器节点都有多条路径到达网关或其他节点，因此它的容故障能力较强。这种多跳系统比星状网络的传输距离远得多，但功耗也更大，因为节点必须一直“监听”网络中某些路径上的信息和变化。

混合网络力求兼具星状网络的简洁和低功耗及网状网的长传输距离和自愈性等优点，如图 1-2（c）所示。在星-网混合网中，汇聚节点/网关组成网状结构，而传感器节点则在汇聚节点/网关周围呈星状分布。汇聚节点/网关扩展了网络传输距离，同时提供了容

故障能力。当某汇聚节点/网关发生故障或某条无线链路出现干扰时，网络可在其他汇聚节点/网关周围进行自组。

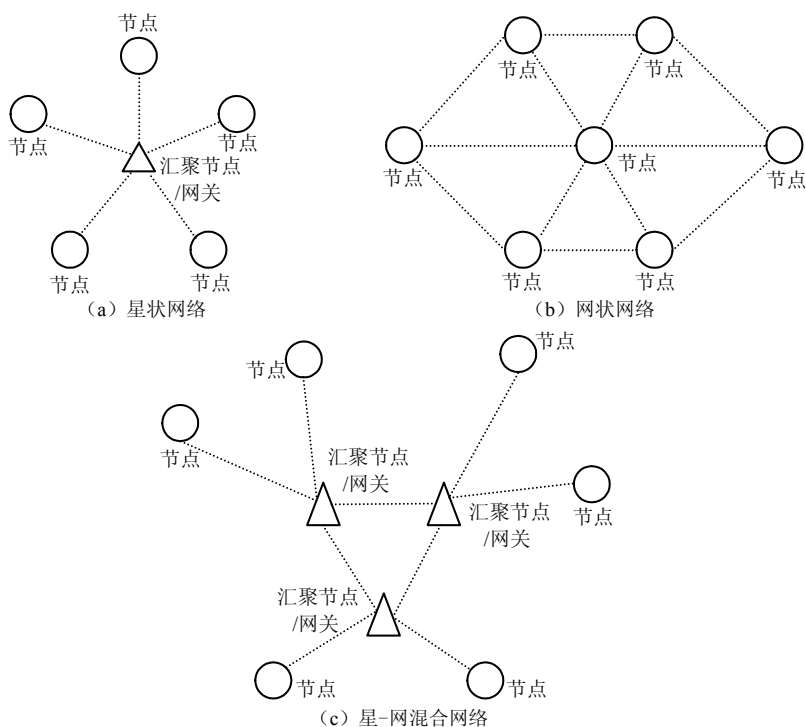


图 1-2 无线传感器网络拓扑结构

随着应用和体系结构的不同，无线传感器网络的通信协议栈也不尽相同，图 1-3 是无线传感器网络的典型协议模型。该模型既参考了现有通用网络的 TCP/IP 和 OSI 模型的架构，同时又体现了无线传感器网络特有的电源管理、移动管理及任务管理。应用层为不同的应用提供了一个相对统一的高层接口；传输层可为无线传感器网络保持数据流或保证与 Internet 连接；网络层主要关心数据的路由；数据链路层协调无线媒质的访问，尽量减少相邻节点广播时的冲突；物理层为系统提供一个简单、稳定的调制、传输和接收系统。除此而外，电源、移动和任务管理负责传感器节点能量、移动和任务分配的监测，帮助传感节点协调感测任务，尽量减少整个系统的功耗。

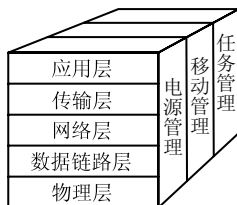


图 1-3 无线传感器网络典型协议模型

### 1.1.4 无线传感器网络关键技术

无线传感器网络作为当今信息科学与计算机网络领域的研究热点，其关键技术具有跨学科交叉、多技术融合等特点，每项关键技术都亟待突破。无线传感器网络的关键技术主要体现在系统设计和系统服务两个方面。这里选取与军事应用联系较为紧密的无线传感器网络关键技术进行简要说明，包括系统设计方面的拓扑控制和网络协议技术，以及系统服务方面的节点定位、时间同步、数据融合、网络安全等技术，以期给读者形成初步印象。在后续的章节中将进一步分类阐述这些关键技术。

#### 1. 拓扑控制技术

对于具有自组织特性的无线传感器网络而言，网络拓扑控制具有特别重要的意义。通过拓扑控制可自动生成良好的网络拓扑结构，能够提高路由协议和 MAC 协议的效率，可为数据融合、时间同步和目标定位等很多方面奠定基础，有利于节省节点的能量，延长网络的生存期。所以，拓扑控制是无线传感器网络研究的核心技术之一。

目前，传感器网络拓扑控制研究的主要热点是在满足网络覆盖度和连通度的前提下，通过功率控制和骨干网节点的选择，剔除节点之间不必要的无线通信链路，生成一个高效的数据转发的网络拓扑结构。拓扑控制可以分为功率型拓扑控制和层次型拓扑控制两个方面。功率型拓扑控制是通过调节网络中每个节点的发射功率，在满足网络连通度的前提下，减少节点的发送功率，均衡节点单跳可达的邻居数目。在这方面，已取得不少的研究成果，如 COMPOW 等统一功率分配算法，LINT/LILT 和 LMN/LMA 等基于节点度数的算法，CBTC、LMST、RNG、DRNG 和 DLSS 等基于邻近图的近似算法等。层次型拓扑控制利用分簇机制，让一些节点作为簇头节点，由簇头节点形成一个处理并转发数据的骨干网，其他非骨干网节点可以暂时关闭通信模块，进入休眠状态以节省能量。利用这种策略，目前已经提出了的 TopDisc 成簇算法，改进的 GAF 虚拟地理网格分簇算法，以及 LEACH 和 HEED 等自组织成簇算法。

除了传统的功率型拓扑控制和层次型拓扑控制，人们也提出了启发式的节点唤醒和休眠机制。该机制能够使节点在没有事件发生时设置通信模块为睡眠状态，而在有事件发生时及时自动醒来并唤醒邻居节点，形成数据转发的拓扑结构。这种机制重点在于节点在睡眠状态和活动状态之间的转换问题，一般不能够独立作为一种拓扑结构控制机制，一般需要与其他拓扑控制算法结合使用。

#### 2. 网络协议技术

由于传感器节点的计算能力、存储能力、通信能力以及携带的能量都十分有限，每个节点只能获取局部网络的拓扑信息，其上运行的网络协议也不能太复杂。同时，传感器拓扑结构动态变化，网络资源也在不断变化，这些都对网络协议提出了更高的要求。

无线传感器网络协议负责使各个独立的传感器节点形成一个多跳的数据传输网络。从层次上看,无线传感器网络协议可以分为应用层、传输层、网络层等协议,目前研究重点是网络层协议和数据链路层协议。网络层的路由协议决定信息的传输路径,数据链路层的介质访问控制协议用来构建数据传输所需的基础通信链路,控制着节点间信道频谱资源的分配和局部范围内无线信道的使用方式。

在无线传感器网络中,路由协议不仅关心单个传感器节点的能量消耗,更关心整个网络能量的均衡消耗,这样才能延长整个网络的生存周期。同时,无线传感器网络是以数据为中心的,这在路由协议中表现的最为突出,每个节点没有必要采用全网统一的编址,选择路径可以不用根据节点的编址,更多的是根据感兴趣的数据建立数据源到汇聚节点之间的转发路径。目前提出了多种类型的无线传感器网络路由协议,如基于能量感知的路由协议,定向扩散和谣传路由等基于查询的路由协议,GEAR 和 GEM 等基于地理位置的路由协议,SPEED 和 ReInForM 等支持服务质量的路由协议。

在无线传感器网络中,MAC 协议首先要考虑节省能源和可扩展性,其次才考虑公平性、利用率和实时性等。在 MAC 层的能量浪费主要表现在空闲侦听、接收不必要数据和碰撞重传等。为了减少能量的消耗,MAC 协议通常采用“侦听/睡眠”交替的无线信道侦听机制,传感器节点在需要收/发数据时才侦听无线信道,没有数据需要收/发时就尽量进入睡眠状态。MAC 协议主要分为 S-MAC、T-MAC 和 Sift 等基于竞争的 MAC 协议,DEANA、TRAMA、DMAC 和周期性调度等时分复用的 MAC 协议,以及 CSMA/CA 与 CDMA 相结合、TDMA 和 FDMA 相结合的混合型 MAC 协议等三大类。由于无线传感器网络是应用相关的网络,应用需求不同时,网络协议往往需要根据应用类型或应用目标环境特征定制,没有任何一个协议能够高效适应所有的不同应用。

### 3. 节点定位技术

根据节点位置是否确定,传感器节点分为信标节点和位置未知节点。信标节点的位置是已知的,未知节点需要根据少数信标节点,按照某种定位机制确定自身的位置。在传感器网络定位过程中,通常会使用三边测量法、三角测量法或者极大似然估计法确定节点位置。根据定位过程中是否实际测量节点间的距离或角度,把无线传感器网络中的定位分类为基于距离的定位和距离无关的定位。

基于距离的定位机制就是通过测量相邻节点间的实际距离或方位来确定未知节点的位置,通常采用测距、定位和修正等步骤实现。基于距离的定位机制由于采用实际测量的节点间距离或角度,因此其定位精度通常相对较高,但也对传感器节点的硬件提出了很高的要求。距离无关的定位机制主要有质心算法、DV-Hop 算法、Amorphous 算法和 APIT 算法等。由于距离无关的定位机制无须测量节点间的绝对距离或方位,因而降低了对传感器节点的硬件要求,更适合于大规模无线传感器网络。相比基于距离的定位机制,

距离无关的定位机制定位误差相对较高,但其定位性能受环境因素的影响较小,并且简单易实施,在部分无线传感器网络应用需求中得到广泛应用。

#### 4. 时间同步技术

时间同步是传感器网络系统协同工作的关键机制之一,如测量移动车辆速度需要计算不同传感器检测事件的时间差,通过波束阵列确定声源位置节点间的时间同步。NTP 协议是 Internet 上广泛使用的网络时间协议,但只适用于结构相对稳定、链路很少失败的有线网络系统;GPS 系统能够以纳秒级精度与世界标准时间 UTC 保持同步,但需要配置固定的高成本接收机,同时在室内、森林或水下等有掩体的环境中无法使用 GPS 系统。因此,它们都不适合应用在传感器网络中。

2002 年 8 月的 HotNetS-I 国际会议首次提出并阐述了无线传感器网络中的时间同步机制的研究课题,在传感器网络研究领域引起了关注。目前已提出了多个时间同步机制,其中 RBS、TINY/MINI-SYNC 和 TPSN 被认为是三个基本的同步机制。RBS 机制是基于接收者—接收者的时钟同步;一个节点广播时钟参考分组,广播域内的两个节点分别采用本地时钟记录参考分组的到达时间,通过交换记录时间来实现它们之间的时钟同步。TINY/MINI-SYNC 是简单的轻量级的同步机制:假设节点的时钟偏移遵循线性变化,那么两个节点之间的时间偏移也是线性的,可通过交换时标分组来估计两个节点间的最优匹配偏移量。TPSN 采用层次结构实现整个网络节点的时间同步:所有节点按照层次结构进行逻辑分级,通过基于发送者—接收者的节点对方式,每个节点能够与上一级的某个节点进行同步,从而实现所有节点都与根节点的时间同步。

#### 5. 数据融合技术

无线传感器网络存在能量约束,减少传输的数据量能够有效地节省能量,因此在从各个传感器节点收集数据的过程中,利用传感器节点的本地计算和存储能力进行数据融合,去除冗余信息,可以达到节省能量的目的。同时由于战场环境的复杂性导致传感器节点感知信息存在噪声,因此也需要数据融合技术对目标区域中多份数据进行关联分析,以提高信息的准确度。

数据融合技术可以与无线传感器网络的多个协议层进行结合。例如,在应用层设计中,可以利用分布式数据库技术,对采集到的数据进行逐步筛选,达到融合的效果;在网络层设计中,很多路由协议均结合了数据融合机制,以期减少数据传输量;此外,还有研究者提出了独立于其他协议层的数据融合协议层,通过减少 MAC 层的发送冲突和头部开销达到节省能量的目的,同时又不损失时间性能和信息的完整性。数据融合技术已经在目标跟踪、目标自动识别等领域得到了广泛的应用。在无线传感器网络的设计中,只有面向应用需求设计针对性强的数据融合方法,才能最大限度地获益。

总体而言,数据融合技术在节省能量、提高信息准确度的同时,要以牺牲其他方面的性能为代价。首先是延迟的代价,在数据传送过程中寻找易于进行数据融合的路由、进行数据融合操作、为融合而等待其他数据的到来,这三个方面都可能增加网络的平均时延。其次是鲁棒性的代价,无线传感器网络相对于传统网络有更高的节点失效率以及数据丢失率,数据融合可以大幅度降低数据的冗余性,但丢失相同的数据量可能损失更多的信息,因此相对而言也降低了网络的鲁棒性。

## 6. 网络安全技术

无线传感器网络作为任务型的网络,不仅要进行数据的传输,而且要进行数据采集和融合,以及任务的协同控制等。如何保证任务执行的机密性、数据产生的可靠性、数据融合的高效性以及数据传输的安全性,就成为无线传感器网络安全问题需要全面考虑的内容。为了保证任务的机密布置和任务执行结果的安全传递和融合,无线传感器网络需要实现一些最基本的安全机制:机密性、点到点的消息认证、完整性鉴别、新鲜性、认证广播和安全管理。除此之外,为了确保数据融合后数据源信息的保留,水印技术也成为无线传感器网络安全的研究内容。

无线传感器网络的特点决定了它的安全与传统网络安全在研究方法和计算手段上有很大的不同。首先,无线传感器网络单元节点的各方面能力都不能与目前 Internet 中任何一种网络终端相比,所以必然存在算法计算强度和安全强度之间的权衡问题,如何通过更简单的算法实现尽量坚固的安全外壳是无线传感器网络安全的主要挑战;其次,有限的计算资源和能量资源往往需要系统的各种技术综合考虑,以减少系统代码的数量,如安全路由技术等;另外,无线传感器网络任务的协作特性和路由的局部特性使节点之间存在安全耦合,单个节点的安全泄露必然威胁网络的安全,所以在考虑安全算法的时候要尽量减少这种耦合性。

## 1.2 无线传感器网络军事应用现状

无线传感器网络具有快速部署、自组织、隐蔽性强以及容错性好等特点,在军事上具有广泛的应用前景。战场环境恶劣,作战态势瞬息万变,战机稍纵即逝,作战指挥员需要即时了解掌握部队全方位的情况。部署在作战区域内的传感器节点可以采集相应的信息,并通过汇聚节点将数据送至指挥所,再转发到指挥部,最后融合来自各战场的数据,形成完备的战场态势图。与雷达、红外设备以及天基 ISR 等通用传感手段相比,无线传感器网络在军事应用上具有以下三个特点。

### 1) 布设灵活快速

军事应用中,无线传感器网络通常部署在战场或者其他有敌意的对抗环境中,采用



传统的人工布设方式可能会带来人员伤亡。而无线传感器网络节点因具有投放后自组织、自适应、体积小以及加固后抗震性好的特点,因此可以采用飞行器空投、机器人布设等方式,按照作战人员的要求,随机、快速地布设在需要长期或临时监控的地区。节点到达地面后,即可形成动态的拓扑结构并开始工作,无须人工介入。这种快速、灵活的布设方式保证了无线传感器网络成为一种非常灵活的侦察手段。

### 2) 近距离探测

无线传感器网络节点体积小,功率低,不易被发现,具有较强的隐蔽性,可以在敌方目标附近布设,尤其在传统传感器不易使用的城市作战环境中使用,作用更加突出。而且,由于距离目标较近,可以克服环境噪声对系统性能的影响,有助于改善探测性能;可准确地定位低截获/低可探测性目标的位置及其信息网络,为后续的网络化电子攻击提供必要的信息。

### 3) 网络容错能力强、传感工作模式多

无线传感器网络节点成本低廉,未来单个节点的价格有望低于 1 美元。但是单个节点受资源限制,功能也十分有限。通常,磁传感器的探测距离为 25m,正确识别概率小于 50%;震动传感器的探测距离为 350m,正确识别概率在 50%~60%之间;声传感器的探测距离为 500m,正确识别概率也是在 50%~60%之间。因此,需要布设大量的节点构成网络来提高对目标的正确识别率及定位精度。并且,由于节点数量巨大,即使单个节点失效,对网络的整体性能影响也不大,网络容错能力很强。此外,根据任务需求,网络节点可采用雷达、红外、震动和磁等不同类型的传感器对目标的各种物理参数进行测量,这些测量信息相互融合、相互印证,确保网络具有较高的探测性能。

正是由于无线传感器网络这些独特的优势,使得无线传感器网络的应用一直是军事研究热点。目前国内外相关机构开展大量的无线传感器网络的军事应用研究项目,取得了不少研究成果,美国在全球范围内引领了无线传感器网络军事应用研究潮流,下面主要以美国开展的项目研究和取得的成果为例描述国外无线传感器网络的研究和应用现状。

## 1.2.1 国外应用现状

早在 20 世纪 90 年代,美国就开始了传感器网络的军事应用研究工作。美国军事研究实验室(U. S. Army research Lab)下属的一个战略评估小组曾经明确指出:使用大功率且具有无线通信能力的传感器系统是不实用的,大量部署简单、廉价、独立的设备可能是未来战场感知中的有效方法。总结这些年来美国在无线传感器网络军事应用方面的研究项目,发现美军应用研究目前主要涵盖了四个领域,如表 1-1 所示。

表 1-1 美军无线传感器网络研究应用领域和项目名称

应用领域	项目名称
战场侦察监视	“智能微尘” “热带树”和“远程战场监视传感器系统” .....
战场态势感知	“无人值守地面传感器群” “传感器组网系统” .....
目标定位跟踪	“沙地直线” “目标定位网络嵌入式系统” .....
军队后勤保障	“全资产可视化系统” .....

下面选取其中的几个典型应用项目进行简单阐述。

1. “智能微尘”

“智能微尘”是一个由具有计算能力的低成本、低功耗（相当于手机使用功率的1/1000）的超微型传感器（一些传感器只有阿司匹林药片那么大，但绝大部分传感器的体积相当于一个传呼机）所组成的网络，该网络可以监测周边环境的温度、光亮度和振动程度，它甚至还可以察觉到周围是否存在辐射或存在有毒的化学物质。“智能微尘”使用微电子机械系统技术设计，能够通过飞机散播到敌方公路、阵地上。以电池驱动的“智能微尘”能够感应到敌方的活动，并能够把得到的信息传送回总部，用于侦察附近敌方部队的活动。

2. “热带树”和“远程战场监视传感器系统”

在敌方阵地附近的道路、桥梁、港口等关键地区部署各种类型的传感器，了解敌方动向，以及武器装备的部署情况。分布式传感器在军事领域的应用已有几十年的历史。早在越南战争期间，美军就使用了当时被称为“热带树”的无人值守传感器网络来对付北越的“胡志明小道”。“热带树”在越战中的成功应用，促使许多国家战后纷纷研制和装备各种无人值守的地面传感器系统（Unattended Ground Sensors, UGS）。美军的远程战场监视传感器系统（Remotely Monitored Battle Area Sensors System, REMBASS）项目已经为 UGS 的成功使用进行了验证。REMBASS 使用了远距离监视传感器。由人工放置在敌人可能经过的道路，这些传感器可以对敌人的活动引起的信号做出响应，记录下诸如地面震动、声音、红外和磁场变化等物理量。

3. “无人值守地面传感器群”

“无人值守地面传感器群”项目由美国陆军于 2001 年提出，其主要目标是使基层部

队指挥员具有在他们所希望部署传感器的任何地方灵活地部署传感器的能力，并且能详尽地收集战场各种精确信息，比如丛林地带的地面坚硬度和干湿度，为更准确地制定战斗行动方案提供情报依据。部署的方式依赖于需要执行的任务，指挥员可以将三种传感器进行最适宜的组合来满足任务需求。无人值守地面传感器作为美军未来战斗系统的一部分，主要分为战术 UGS 和城区 UGS 两种类型。战术 UGS 主要包括情报侦察监视 UGS 和化学、生物、辐射和核 UGS；城区 UGS 也称为城市地形军事行动先进传感器系统，用于城区环境下的态势感知和部队保护，以及在城市地形军事行动环境中对已清理区域内滞留部队的保护。

#### 4. “传感器组网系统”

“传感器组网系统”项目由洛克希德·马丁公司开发。传感器组网系统可以使得传感器工作实现自动化，同时通过管理和协调不同传感器，可在动态环境下获得、综合并生成高质量的数据。传感器组网系统的核心是一套实时数据库管理系统。该系统可以利用现有的通信机制对从战术级到战略级的传感器信息进行管理，而管理工作只需通过一台专用的商用便携机即可完成，不需要其他专用设备，该系统以现有的带宽进行通信，并可协调来自地面和空中监视传感器以及太空监视设备的信息，并且该系统可以部署到各级指挥单位。

#### 5. “沙地直线”

在美国国防高级研究计划局的资助下，美国俄亥俄州开展了“沙地直线”（A Line in the Sand）项目开发，这是一种无线传感器网络系统，能够散射“电子绊网”（Trip Wires）到整个战场以侦测运动的高金属含量目标，这种能力意味着一个特殊的军事用途，如侦察和定位敌军坦克和其他车辆。在“沙地直线”项目的基础上，美军进一步进行了超大规模无线传感器网络的研究。美军在 2004 年 12 月进行了史上最大规模的无线传感器网络试验。在名为“ExScal”的网络中 1300m×300m 的地域内部署了 1200 个网络节点，成功检验了网络稳定性、网络冗余配置等方面的研究成果。

#### 6. “目标定位网络嵌入式系统”

目标定位网络嵌入式系统技术（Network Embed System Technology）是美国国防高级研究计划局主导的一个战场应用实验项目，它将实现系统和信息处理融合。项目短期目标是建立包括 10~100 万个计算节点的可靠、实时、分布式应用网络。这些节点包括连接传感器和控制器的物理和信息系统部件。基础嵌入式系统技术节点采用现场可编程门阵列（FPGA）模式。该项目应用了大量的微型传感器、微电子、先进传感器融合算法、自定位技术和信息技术方面的成果。项目长期目标是实现传感器信息的网络中心分布和融合，显著提高作战态势感知能力。该项目成功验证了能够准确定位敌方狙击手的传感

器网络技术，它采用多个廉价音频传感器来协同定位敌方射手并标示在所有参战人员的个人计算机中，三维空间的定位精度可达到 1.5m，定位延迟仅为达到 2s，甚至能显示出敌方射手采用跪姿和站姿射击的差异。

## 7. “全资产可视化系统”

利用无线传感器网络对军事装备、弹药等物资进行管理与调配，实现物资管理的“可视化”，可以在战场瞬息万变的情况下缩短供应时间，提高战场保障效率。比如，在油库安装无线传感器节点设备，对油料进行监控，当油料缺少时报系统油库缺油，然后由工作人员及时补充油料，此举可以大大减少人力的支出，缩短了时间。在伊拉克战争期间，美军在后勤保障上应用了大量无线传感器网络，战争结束后，美军军方进行数据统计，发现未使用无线传感器网络的物资调配要比使用无线传感器网络的物资调配多浪费 30% 人力和 25% 的时间。因此美军反思了后勤保障体系的缺陷，提出了全资产可视性计划，命名为全资产可视化（Total Asset Visibility, TAV）系统。全资产可视化系统是基于信息化作战的需要，通过构建军队资产信息网络系统，为军队各级指挥员和资产使用管理人员（用户）及时准确地提供全部资产的有关位置、运动和状况的全面信息，以及识别部件、人员、装备和补给品的管理能力。该系统是随着信息化和高科技战争后勤保障对资产管理提出的新需求而阐释的一种新概念。依托该系统，美军可以在几秒内计算出数月内后勤保障的准确情况，包括物资的消耗状况以及后勤保障需求。该系统不仅可以对后勤资源实施全面监控，还能对部队机动、军事交通运输、伤员后送等保障活动进行全程动态跟踪。

### 1.2.2 国内应用现状

中国有关无线传感器网络的研究和应用启动较早。实际上在 1999 年，无线传感器网络及其应用研究就正式出现在中国科学院《知识创新工程试点领域方向研究》的“信息与自动化领域研究报告”中。国内的一些科研单位和大学，如中国科学院自动化所、软件所及清华大学、哈尔滨工业大学从 2002 年开始在时间同步与定位、传感器数据管理系统方面开展了研究工作。重庆大学也在同一时间开始研究嵌入式无线传感器网络节点、可重构技术、无线传感器中的定位等技术。2004 年，中国国家自然科学基金委员会将一项无线传感器网络项目（面向传感器网络的分布自治系统关键技术及协调控制理论）列为重点研究项目；2005 年，将无线传感器网络基础理论和关键技术列入计划；2006 年，将水下移动传感器网络的关键技术列为重点研究项目。国家发展和改革委员会（简称“国家发改委”）在下一代互联网（CNGI）示范工程中，也部署了无线传感器网络相关的课题。2006 年初发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》为信息技术定义了三个前沿方向，其中两个与无线传感器网络的研究直接相关，即智能感知技术和自组织网络技术。

近年来,中国国家自然科学基金、国家“863”计划基金对传感器网络的研究越来越重视。国家自然科学基金支持研究项目及国家“863”计划基金从最初的每年两到三项,增加到现在每年几十项。中国的一些研究机构开展了很多无线传感器网络领域的研究,包括中国科学技术大学、清华大学、中国科学院计算技术研究所(简称中科院计算所)、中国科学院上海微系统与信息技术研究所(简称上海微系统所)、中国科学院沈阳自动化研究所(简称沈阳自动化所)及合肥智能机械研究所等研究单位。国内也有越来越多的企业开始关注无线传感器网络技术的发展,开始推出针对无线传感器网络及 ZigBee 的解决方案。总体来说,有关无线传感器网络的应用研究已经得到高度重视,但截至目前有关专门的军事应用研究还不多见,特别是与国外相比,大部分研究停留在理论仿真层面,真正的试验工作开展很少。

### 1.2.3 应用现状总结

进入 21 世纪以来,由于无线传感器网络符合现代军队转型要求,得到多数发达国家特别是美国军方的高度重视和大力发展,进入了快速发展阶段。如上所述,美国国防部组织实施了多项计划,极大地推动了无线传感器网络技术的发展和军事应用。从目前总体情况上看,美军无线传感器网络研究成果处于原理样机、演示验证样机和工程样机的开发及小规模初始应用阶段,距离大规模实际装备也存在一定的距离,许多技术难关亟待突破,但是军方对无线传感器网络装备的需求十分迫切。例如,美军在伊拉克城市作战环境条件下,在巷战环境或重点作战地区缺乏有效灵活的侦察手段,迫切需要无线传感器网络装备投入使用。为此,以 UGS 为代表的新一代装备自 2006 年开始逐步投入部队使用。如前所述,UGS 是新一代无人值守地面传感器的典型产品,它采用自组网技术,主要用于目标探测、定位、跟踪和识别,基本可以代表目前地面无线传感器网络装备的整体水平。尽管这一系统还未全部研制成功,部分能力尚未达到预期目标,但首批 UGS 产品已投入伊拉克战场使用,实际效果良好。下面重点对美军无线传感器网络的应用现状进行分析归纳,并结合国内研究应用情况,无线传感器网络军事应用现状整体而言呈现以下五个特点。

#### 1. 节点应用网络已初具规模

美军开发出的网络节点数基本是在数十个至数百个之间,有的可以达到上千个。例如,通用动力公司为陆军开发的大规模可部署无人值守地面传感器集群 UGS,由 30 个声、震动等类型节点组成网络,可探测、分类、识别、定位和报告威胁。网络嵌入系统计划开发出的网络由 522 个节点组成,2005 年完成了现场试验。前面提到的“ExScal”网络已经可以实现 1200 多个节点的组网。

## 2. 多模式传感手段综合使用

无线传感器网络具备采用多种模式的传感能力,可以使网络在执行侦察任务时,各个节点的探测信息相互融合,互相印证,提高了探测的准确率。例如,陆军的“遥控战场传感器系统”采用了声、震动和红外三个模块,协同探测在监控区域里行进的轮式车辆或留下印迹的平台。多模式的传感信息经处理融合后,可以准确地测量出目标的类型、数量以及目标的方向、位置和速度。“未来作战系统中的无人值守地面传感器”(Future Combat System Unattended Ground Sensors, FCSUGS)计划中开发的战术 UGS 也使用 ISR 节点和红外节点两种传感模式,为了确保数据可靠,ISR 节点触发的告警要由红外节点成像进行确认。

## 3. 部分关键问题已有效解决

节点虚警率高是无线传感器网络实际应用存在的难点问题之一。降低传感器节点的虚警,确保信息的准确性,是美军一直着力解决的问题。近年来,随着数字技术的应用,节点虚警率高的问题已经得到了有效解决。美军新开发的传感器大都采用了可编程数字处理技术。例如,数字技术的应用使得无源红外传感器具备了消除各种虚警的能力。

## 4. 多种布设方式快速涌现

随着节点技术的发展,新型节点已具备较强的抗震加固性能。空投与手动布设共同成为主要的布设方式,使得布设更加快速、灵活。例如,“狼群”在试验时就是由无人机空投的。此外,美军还在开发机器人布设方式。在城市作战环境中,对建筑物内等一些视野不开阔的地方,机器人已经投入部队使用,由操作人员遥控机器人布设无线传感器网络节点,既可以使布设的位置更加科学、又避免了人工布设的风险。

## 5. 装备功能不断改进完善

军用无线传感器网络虽然取得了快速发展,但由于能量管理、无线组网、多节点控制等技术没有完全突破,整体发展基本处于技术演示或样机阶段,仅部分产品应军方需求投入使用。目前,部队使用的主要产品是“遥控战场传感器系统”(REMBASS,即“伦巴斯”系统)。该系统采用了震动、声模块和可选择红外或磁的插件模块三种探测模块,不同模式的探测距离在 250~300m 之间,主要探测目标为轮式或可留下轨迹的平台。它自 20 世纪 80 年代进入美国陆军服役,已几次升级,20 世纪 90 年代为 REMBASS-I,最近又升级为 REMBASS-II。2004 年,REMBASS-II 进入“斯瑞克”旅作战小组,并正在逐步取代早期产品。REMBASS-II 的传感器类型与 I 相似,但功能有极大提高,其特点包括:① 尺寸小,重量轻,功耗低,使用时间长。传感器组件使用四块符合商用标准的 9V 电池,电池重量仅为 2.2g。采用这四块电池,REMBASS-II 工作时间可超过 30 天,每天可发送 1000 条信息。② 采用复杂的信息处理技术,探测率高,虚警率低。③ 识别能力

有较大提高。通过传感器与操作员显示软件,可以确定目标类型、数量及方向,估算其位置与速度,并能够识别出直升机、固定翼飞机以及轮式或可留下轨迹的平台的尺寸、重量等细微差别。④ 通信距离远。传感器利用 VHF 频段低可截获性/低可探测性传输技术,在 15km 范围内发送目标数据信息,并可根据需要扩展通信距离。⑤ 具有较强的兼容性。系统可以应用其他类型传感器,如生物/化学、射频、气象以及光电成像传感器节点,而且不需要对硬件作出任何改变。

### 1.3 无线传感器网络军事应用的趋势

随着技术的不断进步,技术成熟度越来越高,军事领域中无线传感器网络的微型化、长寿命、多功能、机动性强等特点将更加清晰,产品性能不断提升,应用领域不断拓展。通过分析国内外尤其是美军无线传感器网络军事应用现状,可以认为无线传感器网络军事应用趋势主要表现在以下六个方面。

#### 1. 节点纳米级化,“喷洒”部署将成为可能

随着“微机电系统”(MEMS)技术的深入应用,节点的尺寸正在不断缩小,如“智能微尘”就是基于 MEMS 技术的微型硅传感器。近年来,“射频微机电系统”(RFMEMS)技术的不断成熟,更加推动了节点的微型化和一体化,使集信息采集、处理、传输和执行于一体的系统级芯片的制作成为可能。随着纳米技术、通信技术、微处理技术、新型传感器材料与封装技术的发展,2010 年以后,具有一体化计算/存储/通信/感知能力的、体积微小如尘埃的纳米级节点有望面世。此外,随着能量管理技术的发展,新型致密能源电源如太阳能电池会投入应用,再配合更加先进的节能策略,无线传感器网络的寿命可由原来的数周延长至数月,甚至数年。数量众多的尘埃状的节点将以“喷洒”的方式部署在目标区域内,具有更强的隐蔽性和生存性,实际作战能力也会明显提升。

#### 2. 机动型无线传感器网络有望问世

目前,无线传感器网络中的大部分节点的位置是固定的,只有为数不多的节点有移动功能,整体上是一种静态侦察模式。为提高无线传感器网络的机动性,美军正在将微型无线传感器网络技术和微型机器人技术“强强”联合,形成“机器人/传感器群”,通过构建一个更加智能化、更加灵活、更加安全的“机动型”侦察网,对难以侦察的目标无形中实施贴身“蜂群”式探测、跟踪与识别。美国陆军实验室对此进行了验证。美国陆军在 iRobot 公司开发的 Packbot 机器人上安装了 8 个信道、具有一定信号处理与通信功能的声阵列,演示基于机器人平台的声阵列网络的性能。在产品野外试验中,安装在机器人平台上的声阵列已具备了探测经过节点布设区域内的目标。此外,陆军 FCSUGS 也在开发以微型无人自主地面车辆作为平台的车载无人值守传感器网络。随着这项技术的

成熟,具有自行决策和机动侦察能力的“微型机器人/无线传感器网络”有望出现在未来信息化战场上,成为新的信息感知手段。而且,如果“机器人/传感器群”配备高能量密度的弹药,遂行侦察与摧毁任务,其威胁程度还会进一步提高。

### 3. 无线传感器网络功能将不断扩展

美军在研的“狼群”系统将无线传感器网络由传统的侦察功能扩展到电子对抗领域。“狼群”集电子侦察、电子攻击和电子防护三种功能于一体,由无人机或无人地面车辆布设在接近目标的空域内,自定位并自组网后,实施作战任务。“狼群”布设后,广域频谱监控是其基本功能,利用传感器网络进行全天候态势感知并精确定位关键目标,将侦察到的目标信息通过卫星或无人机中继到远程控制中心,以自主或接收指令的方式对所选定的电子设备发动“狼群”式定向电子攻击。在实施电子攻击时,“狼群”首先进行环境频谱分析,确定敌发射机的位置及其网络特性,根据侦察结果和预定的响应规划,实施电子攻击。在进行电子防护时,“狼群”首先判断敌我射频覆盖范围,然后按照指挥官的指令,采用提高噪声值等手段,保护己方军队的信号不被敌方信号情报装备发现,还可以通过发射虚假信号掩护己方军队的机动。通常,每个“狼群”包括6~10只“狼”,每只“狼”的体积小于 $570\text{cm}^3$ ,重量低于 $1.35\text{kg}$ ,可在距离敌方发射机3~5km的位置布设,可在 $25\text{MHz}\sim 2.5\text{GHz}$ 的范围内进行干扰。对付典型发射机时,能够在2s内实现定位,目标定位误差为10m。目前,现有的系统硬件和功能还不能完全满足军方的需求,DARPA计划进一步降低系统成本,减小尺寸,降低重量,增强无线电频率覆盖范围,并实现“狼群”与其他传感器之间的协同传感能力。美军计划在2010年部署“狼群”。部署后,“狼群”将主要用于压制敌方防空系统,它的近距离、隐匿式探测和攻击方式,将会给对方的防空雷达网和通信网的安全造成严重威胁。

### 4. 无线传感器网络将融入全球侦察打击链

美军正在开发先进连网技术,将FCSUGS及“狼群”等网络与天基传感器、机载传感器、地面传感器连接,实现功能互补,信息互融,共同构建全球范围的“无缝”态势感知网,以进一步增强信息优势。例如,通过将FCSUGS的信息传送到指挥中心与其他信息融合后形成战场态势感知图,可大大提高战场侦察能力。美军还计划将“狼群”获取的目标信息直接发送到“未来作战系统”等平台用于火力打击,实现无线网络传感器与美军全球侦察打击链的融合。可以预测,融入全球侦察打击链后,无线传感器网络的威胁还将进一步提高。

### 5. 新一代无线传感器网络性能将更加先进

FCSUGS是新一代无人值守地面传感器的典型产品,其发展方向代表着未来地面无线传感器网络系统的总体走势。FCSUGS的特点包括:①功能强大。可用于边界防御、



监视、目标采集、态势感知，其中还包括对化学、生物和核攻击的早期预警。按其陆军计划，FCSUGS 在 2008 年应具备辐射以及核探测功能，在 2011 年具备探测化学攻击的能力。随着生物传感器技术的成熟，该系统未来还将具备生物攻击预警的功能。② 节点采用模块化结构。有多种模式节点，能够根据不同的任务需求选择不同的 ISR 节点、红外节点和网关节点，具有较强的灵活性。③ 传感器网络与智能弹药系统配合使用，使网络数据直接用于作战。尽管 UGS 系统第一代产品已应用于伊拉克战场，但仅采用了声传感器单一模式，功能有限。美国陆军表示，第二代产品将采用视频、照相、磁等多模式探测手段，并可利用战场无线网络传输信息，功能有望大幅提升。

#### 6. 超宽带无线传感器网络将成为重点发展方向之一

当前无线传感器网络使用的传统正弦载波通信由于其固有的组成，以及一些无法克服的缺陷而无法满足传感器节点低成本、低功耗、低设计复杂度和抗干扰等方面的要求。而近年来新兴的超宽带脉冲无线电技术，具备了许多正弦载波通信技术无法比拟的优势。随着无线传感器网络技术的发展和超宽带技术的逐渐成熟，军方开始将超宽带技术应用于无线传感器网络中。





## 第2章

# 无线传感器网络军事应用理论

无线传感器网络具有可快速部署、抗毁和容错等独特优势，非常适合在恶劣的战场环境中进行敌情侦察、目标定位、战区监控和生化攻击等多种军事任务。由于无线传感器网络在军事上的巨大应用价值，使得无线传感器网络军事应用的理论研究，成为当前学术界关注的热点。本章将从无线传感器网络军事应用的需求出发，分析无线传感器网络军事应用模式，研究无线传感器网络军事应用体系架构，并提出无线传感器网络军事应用的技术架构，使读者对无线传感器网络军事应用理论有一个初步的认识和了解。



## 2.1 无线传感器网络军事应用需求

技术上的突破往往能引领战争方式的重大变革,无线传感器网络具有快速部署、隐蔽性强、自组织以及良好的容错性等特点,在军事上具有广泛的应用前景。在战场上,战斗环境恶劣,作战态势瞬息万变,战机稍纵即逝,作战指挥员需要即时了解掌握部队全方位的情况,铺设在作战区域内的传感器节点可以采集相应的信息,并通过汇聚节点将数据送至指挥所,再转发到指挥部,最后融合来自各战场的的数据,形成完备的战区态势图,有效破除了“战争迷雾”,为先敌发现,先敌了解,先敌决策,先敌行动,快速精确打击等提供有效支撑。目前来看,无线传感器网络在军事应用中的潜在优势主要表现在以下几个方面:

### 1) 部署方便快捷

可通过飞机抛撒、火箭弹射和炮弹抛射等方法,直接将传感器节点快速部署到敌方阵地,或者在公共隔离带以人工或机械方式快速部署无线传感器网络,以实现隐蔽且近距离准确收集战场信息的目的。

### 2) 生存能力强

一方面,传感器节点是一种微型设备,其体积可以不超过 1 立方毫米,这一优势使得传感器节点不易被敌方发现,从而提高了节点的生存能力;另一方面,无线传感器网络是一种自组织网络,无中心节点。因此在某些节点被破坏时,仍然能够正常工作,从而使得网络具有很高的生存能力。

### 3) 容错性好

无线传感器网络由大量廉价的传感器节点组成,这使得网络内存在许多冗余节点,为整个系统提供了较强的容错能力。由于其采用动态拓扑结构和多跳路由,其数据传输链路也有大量冗余,因此在网络工作过程中,可实时加入新节点或删除失效节点,从而有力保证了网络的可靠性和容错性。

### 4) 准确性高

由于无线传感器网络部署规模大,其可在监测区域部署大量传感器节点,并与监测目标近距离接触。这使得网络具备了对监测对象形成分布式、多角度、全方位的监测能力,通过数据融合技术,可以将多节点在多方位上获取的信息进行综合,从而能够有效地提高信噪比,极大地减少了环境噪声对系统性能的影响,提高了监测的准确性。

### 5) 无人值守

由于无线传感器网络在部署后采用自组织方式组网,而且传感器节点都依靠自带电源或自主获取电源维持工作,再加上采用启发式的节点唤醒和休眠机制,因此无线传感器网络无须人工值守,特别适合在恶劣的战场环境和不易于人进入或长期驻守的特殊区

域应用。

正因为这些优势,无线传感器网络引起了以美国为代表的世界军事强国的广泛关注,并被广泛研究和应用实践。目前,随着研究和应用的不断深入,无线传感器网络对现有军事信息系统的建设和发展产生了巨大影响,它通过集成多种类型信息感知设备或手段强化了对战场物理世界的感知,实现了认知域、信息域、物理域的无缝铰链和融合,通过快速部署、隐蔽感知、分布式计算和无线传输,将战场前后方的各种作战力量、作战单元、作战要素等实体连接起来,实现了实体之间的信息共享与交互,促进了战场空间各级各类作战实体的有机融合。可见,将无线传感器网络应用于军事领域,将会极大提高战场的信息化水平,全面拓展未来作战的时域、空域和频域,使战场态势感知更加透明实时、武器装备管理更加智能,以及后勤保障更加灵敏,为目标探测、跟踪识别、指挥控制、火力打击、毁伤评估、综合防护等诸行动“联动化”提供支撑,将全面提升基于信息系统的体系作战能力,并推动战争理论、战争形态和作战样式的变革。因此,无线传感器网络将成为信息化战争中研究和应用的重点,目前来看,其重要性和作用主要表现为以下几个方面。

### 1. 可提高战场感知的实时透明化程度

在未来的信息化战场上,能否保持信息优势将成为决定战争胜负的关键因素。信息化战争要求作战系统“看得明、反应快、打得准”,谁在信息的获取、传输、处理上占据优势,谁就能掌握战争的主动权。无线传感器网络被誉为信息化战场上的神经末梢,堪称信息化战场的宠儿,其最大的优势在于可以在恶劣环境下近距离隐蔽式实现战场感知的精确化和实时化,为战场上带来新的电子眼和电子耳,极大缩短从侦察到决策、行动、反馈、评估、再次行动的时间,全面提升现有战场感知系统的情报侦察能力。

传统的战场侦察手段,如侦察卫星、高空侦察机、特种侦察大队等,获得的战场情报内容较概略,处理周期较长,时效性较差,只能保障战役行动。而利用随机布撒的声、光、电磁、震动、加速度等微型传感器,构建自组织无线传感器网络,可实现近距离侦察感知目标地区作战地形、敌军部署、装备特性及部队活动行踪、动向等信息,为战术行动提供全面可靠的战场信息,作为传统战场感知手段的有效补充,以扩大战场感知的时域、频域和空域,可有效满足未来信息化战场大范围、全天候、多方位信息获取与态势感知的需求。

### 2. 可提高武器装备管控的智能化水平

智能化的武器装备将成为未来战场的主角,无线传感器网络技术可以从以下三个方面,为武器装备智能化提供支撑:一是利用各种内嵌或外联的传感器和感知控制网络,实现对装备工作状况、性能水平的动态感知和实时分析,全过程、全生命周期地跟踪与

监控装备的使用、故障、维修、保养和报废等情况，实现对武器装备的科学管理；二是通过加装传感器，利用电子标签与射频识别等技术，为武器装备构建统一的“身份证”，随时感知和掌握武器装备的位置、分布、聚集、运动等情况；三是依托无线传感器网络，武器装备对战场信息进行智能化采集、加工、处理、分析，自主地提炼有效信息，随时获取己方坐标、战场态势、敌方威胁等信息，并及时做出响应，提高了作战打击的速度和精确度，提高了武器装备的战场生存能力，从而使武器装备的战场生存与控制将更加智能，其中典型实例如基于无线传感器网络的智能地雷系统。可见，传感器技术在武器装备领域的应用，将使无线传感器网络的触角融入到战场上的每个单兵以及每件武器装备中，为全面提高武器装备的精确保障、武器装备的实时维修以及构建“从传感器到射手”的武器控制体系提供了实现基础。

### 3. 可提高后勤保障的集约灵敏化深度

信息化条件下的作战对后勤保障的依赖性大大增强，无线传感器网络技术为真正实现动态自适应后勤保障提供了解决途径。通过各类传感器可实时自动获取在储、在运、在用物资的信息，能够准确感知、实时掌握后勤物资请领、运输、接收、储存和发放的时间、地点、速度及准确度，同时能够使保障对象位置变化和物资需求变化等动态信息与后勤保障物资的数、质、时、空等静态参数进行实时匹配，提高了后勤保障行动的及时性与准确性，也为实现后勤物资在各种军事行动中全过程管理提供支撑。

利用无线传感器网络对军事装备、弹药等物资进行管理与调配，实现了物资管理的“可视化”，可以在战场瞬息万变的情况下缩短供应时间，提高战场保障效率，有效实现了后勤保障从“静态”到“动态”，从“粗放”向“精细”的转变。比如，在伊拉克战争期间，美军在后勤保障上应用了大量无线传感器网络，战争结束后，美军军方进行数据统计，发现未使用无线传感器网络的物资调配要比使用无线传感器网络的浪费人力 30%，浪费时间 25%。可见，在后勤保障领域利用无线传感器网络，能够显著提高后勤保障的集约灵敏化程度。

#### 2.1.1 战场感知领域应用需求

21 世纪，信息时代的现代战争可以用两个词来描述，那就是“感知”和“透明”，最近几场高新技术局部战争表明，谁拥有感知战场态势的能力，谁就能够透彻地了解对手，掌握敌我情，先敌决策，快于对手行动，谁就能完全控制战场从而赢得战争胜利。正因为如此，信息时代的现代战争被喻为“感知者的胜利”，目前世界各国都非常重视战场感知相关技术的研究。

从战场感知的发展来看，战场感知是随着信息技术、特别是信息探测技术的发展以及新军事变革理论的深化而产生的新概念。所谓战场感知（Battlefield Awareness, BA）

是指所有参战部队和支援保障部队对战场空间范围内的敌、我、友各方兵力兵器部署、武器装备和战场环境等信息的全面实时掌握的过程。战场感知包括“信息获取”、“精确信息控制”和“一致性战场空间理解”三要素,其中“信息获取”指及时、充分、准确提供敌、我、友部队的状态、行动、计划和意图等信息;“精确信息控制”指动态地控制和集成战术指挥、控制、通信、计算机、情报、监视与侦察等各种信息资源;“一致性战场空间理解”是指参战人员对敌、友和地理环境理解的水平与速度,保持战术部队和支援部队对战场态势理解的一致性。

目前,随着无线传感器网络、无人机、卫星等新技术的发展,极大地丰富了战场感知“信息获取”、“精确信息控制”和“一致性战场空间理解”三要素的实现手段,为全天候、全时段、全方位的战场感知提供了有力支撑。目前,为适应信息化战争对战场感知信息的时效性、准确性的需要,战场感知正呈现出立体化、全谱化和精确化的发展趋势。

### 1. 立体化战场感知对无线传感器网络的需求

信息化条件下的联合作战,作战空间将由传统的三维空间拓展至多维空间,敌对双方将在陆、海、空、天、电磁、网络等多维空间和领域同步展开,全维化、立体化的战场空间感知体系将是未来发展趋势。无线传感器网络以其可在多种恶劣环境下工作,可适应于多种战场空间而成为目前信息化战场的宠儿,在陆战场感知领域,通过飞机或炮弹将声、光、电磁、震动、加速度等微型传感器布撒到战场核心地带,可以实现近距离侦察感知目标地区作战地形、敌军部署、装备特性及部队活动行踪和动向等信息,为军事信息系统提供全面可靠的陆战场信息,有效弥补了卫星、雷达等远程侦察设备的不足,全面提升了联合战场感知能力。在海战场感知领域,利用水下声学传感器构建网状探测传感器网络,使其在广阔的海域内进行监视或者在一段狭长海域内集中监视,对进入该区域的各种潜艇、商船甚至其他小型船只进行监视,并且即使在各种干扰和声混响比较恶劣的濒海环境下,基于无线传感器网络的水下感知系统仍能够快速、灵活和高效地工作,可为海战场感知提供有效支撑。

目前,立体化战场感知技术的发展进一步推动了无线传感网络和无人机的结合,通过无人机可以实现地面传感器网络与卫星、飞机、舰艇上的各类传感器的有机融合,可实现对战场实时监控、目标定位、战场评估、核攻击和生物化学攻击的监测和搜索等功能,全面持续地为作战部队提供大量的目标数据、电磁环境参数、威胁态势和毁伤效果评估等信息,可有效提升现有军事信息系统的战场感知的实时性和准确性。

### 2. 全谱化战场感知对无线传感器网络的需求

全谱化战场感知是指能够在全频谱的范围内获取信息。过去,由于技术条件的限制,战场感知装备多以可见光装备为主,目前逐步研制和开发了利用短波、红外、紫外、微

波、激光等感知设备对战场进行感知,构建在整个频谱波段上都有的感知设备体系,形成全谱化战场感知能力。无线传感器网络中各个传感器节点可以有效集成和装配各类红外、微波、声音等传感器,能够实现多频段信号的探测和获取,并通过内置各类信号处理方法,提高全谱化战场感知的精确度。

目前,随着微机械技术和信息处理技术的发展,新型的微型化传感器得到快速发展和成熟,极大丰富了无线传感器网络的感知能力。利用新型的微型化传感器,无线传感器网络可实现对各类信号的探测,如声、光、电、磁等,并利用网络节点冗余探测特性,通过融合处理方法有效提高探测的准确性。正是因为如此,无线传感器网络正逐渐成为全谱化战场感知的“宠儿”。

### 3. 精确化战场感知对无线传感器网络的需求

战场感知精确化即建立战场“从传感器到射手”的自动感知→数据传输→指挥决策→火力控制→信息反馈的全要素、全过程综合信息链。从而对敌方兵力部署、武器配置、运动状态的侦察和作战地形、防卫设施等环境进行勘察,对己方阵地防护和部队动态等战场信息的实时感知,以及大型武器平台、各种兵力兵器的联合协同和批次使用等实施全面、精确、有效的控制。精确化对于战场感知至关重要,其决定了精确的指挥控制、精确的作战保障及精确的效果评估等,精确化已经成为现代战争的鲜明特征,不仅成为联合作战制胜的重要“砝码”,更成为信息化战争必争之“高地”。

利用十分低廉的各类传感器,在战场上进行抛撒部署,构建近距离、隐蔽的、可全时域工作的基于无线传感器网络战场感知体系,从而对敌方兵力部署、武器配置、运动状态等进行侦察,对作战地形、气候环境、防卫设施等进行感知,对己方阵地防护和部队动态等监控,为大型武器控制、各种兵力兵器联合协同提供全面、精确、有效地控制。例如,美军开发的“智能尘埃”传感器装置,其体积只有沙粒般大小,却包含信息收集、处理、传递所必需的全部要素,可植入到本方各类装备、物资和人员身体上,能全面精确地了解 and 监控战场我方人员、装备及物资流动情况,从而为精确指挥控制提供基础。

#### 2.1.2 武器装备领域应用需求

在信息化战争时代,世界各军事强国都在利用新型的信息技术来推动武器装备的信息化和武器装备管理的信息化。对于武器装备自身信息化,世界主要军事强国都在加速新型信息化武器装备的研发,利用传感器、自组网等新技术来推动武器装备的信息化进程,加速武器装备体系的优化,并不断物化出具备新的实战与威慑能力的装备,进而引发行作战方式和战争形态的重大变革。在武器装备管理方面,部队已经进入应对多种安全威胁、遂行多样化军事任务的新阶段,随着无线传感器网络、射频识别以及移动通信等新技术的发展,部队武器装备管理进入了一个新的发展时期,装备管理的内容、方法、



手段等都有了新的内涵,在目前信息化条件下,如何管好、用好装备,使之始终处于良好的战备状态,达到“平时精细管理、战时精确保障”的目标,依然是一个需要亟需解决的问题。

### 1. 武器装备信息化对无线传感器网络的需求

武器装备信息化是以信息技术改造现有武器装备和发展新型武器装备的过程。其内涵包括三个方面:一是对现有武器装备进行信息化改造,即对现有武器装备加装信息技术装置或将其与信息系统相连接,受信息系统控制,使其具有原先不曾有的信息探测、传输、处理、控制 and 对抗等功能,从而使武器装备的性能和作战效能得到成倍的提高。二是研制、生产、装备新型信息化武器装备。三是对部队武器装备系统进行信息化建设,使信息化武器逐步占据主战武器的主体地位,使预警探测、情报侦察、精确制导、火力打击、指挥控制、通信联络、战场管理等领域的信息采集、融合、处理、传输和显示实现联网化、自动化和实时化。

近期的几场局部战争不断表明,传感器技术已经成为信息化武器装备的“神经元”。传统的大型作战平台由于其自身难以克服的物理缺陷越来越暴露出与现代战争不相适应之处,而由传感器和动作器等主执行装置组成的结构灵巧型武器装备,由于具有重量轻、体积小、造价低、不易被发现和摧毁等特点而备受军事专家青睐。通过各类微型化传感器不仅可以提高武器装备感知外界的能力,还可以实时或近实时地由主动控制装置快速作出响应,全面倍增武器装备的性能。可见,通过各类传感器不仅可以有效改善武器装备的感知能力和信号处理能力,还能提高武器装备的可管控性。

利用各类传感器有效实现智能化武器装备控制,使得各类精确制导武器成为战争的主角。据统计,装有智能系统的制导武器,在战场条件不变的情况下,弹药的命中精度将提高3倍;智能化的辅助指挥系统,能在瞬息万变的战场上帮助指挥员判断情况,下定决心、下达命令。可见,传感器技术的应用使得传统的武器能够“有意识”地寻找、辨别需要打击的目标,形成了一种“会思考”的武器系统。各类传感器技术极大促进武器装备的信息化和智能化,使得具有独立战斗能力的无人作战系统成为未来武器装备发展的主流;形成了各类遥控式和全自主式空中、陆上和水中机器人,并逐步担当起侦察、探测、压制防空、战场毁伤评估乃至无人攻击等作战任务;推动了“智能战术无人车”、“地面无人车”等智能车辆的研制和应用,并正在研究如何利用自组网技术将多个战斗要素实现横向一体化,为高效的指挥控制提供保障。

### 2. 武器装备管理对无线传感器网络的需求

当前,随着高新技术在军事上的不断应用,武器装备的信息化程度越来越高,与之相对应的武器装备管理工作也进入了一个新的发展时期,为了满足信息化战争下精细化武器装备管理的目标,亟需对武器装备管理的内容、方法、手段等进行信息化,使武器

装备管理水平达到精细化管理、精确化保障的目标。

无线传感器网络被称为物联网的神经末梢,通过各类传感器将武器装备的状态进行实时采集、处理和传输,从而对武器装备进行精细化管理,充分发挥每件武器的技术性能,有效提升整体战斗力,保障各个单元完成战时或平时的各项任务。同时,将每一件武器、每一个装备单元作为武器装备管理系统中重要元素,利用传感器技术对其进行分布式智能感知、智能化管理,大到卫星、导弹、飞机、舰船、坦克和火炮等装备系统,小到单兵作战装备,从作战装备系统到保障装备系统,从装备试验到装备生产、从战争准备到战争实施,实现每一个环节的精细化、精确化管理,可以有效解决现有武器装备管理效率低、费用高、保障能力不突出等问题。

同时,全过程、可视化管理也是现代武器装备管理发展的新要求。目前,高新技术条件下的局部战争对武器装备管理系统和军械仓库的软/硬件建设提出了很高的要求,使得传统的武器装备管理模式和保障方式、方法及其技术已经无法适应现代信息化作战的高精度、快节奏、大流量的需要。因此,需要利用传感器技术、信息可视化技术以及移动网络技术实现武器装备管理的信息化和网络化,实现装备全系统、全过程的可视化管理,为部队提供查询、统计、分析、调度、图形显示和输出等功能,从而实时、准确、动态地了解武器装备使用情况以及战时需求情况,为武器装备全系统、全寿命的科学化管理,特别是为武器装备保障行动与整个数字化战场环境融为一体提供支撑,从而全面提高武器装备管理与作战行动的一体化水平,提升信息化战争中一体化作战能力。

### 2.1.3 后勤保障领域应用需求

在以信息技术为主导的今天,信息已成为提高后勤保障力的关键因素,由于信息要素的地位突出,使得后勤保障重点、保障环境与保障时空等诸多方面发生了深刻的变化。目前,世界军事强国都在利用信息化技术不断提升自身后勤保障能力。总的来看,目前后勤保障信息化建设和发展主要是实现后勤保障资源可视化,后勤保障控制精确化,后勤指挥决策智能化,专业勤务保障快速化和后勤保障体系一体化,从而实现未来军事后勤系统所要求的结构形态的无缝衔接、后勤保障的精确灵敏、由上而下的主动配送等,为精确后勤、灵敏后勤、高效后勤、智能后勤、可视后勤、零差后勤提供实现基础。后勤保障建设的新目标极大促进了无线传感器网络在后勤保障领域的应用。

结构形态的无缝衔接是现代后勤建设的核心内容,即对传统的松散后勤进行根本变革,使整个后勤系统中的条条和块块实现前所未有的紧密衔接,使后勤各组成部分形成真正意义上的一体化。这就要求建立以传感器技术为基础的军用物资在储、在运和在用状态自动感知与智能控制信息系统,在各类军用物资上嵌入统一的相关信息传感器或智能标签,通过读/写器自动识别和定位分类,实施快速收/发作业,并实现从生产线、仓库

到散兵线的全程动态监控。同时,还可以利用传感器节点自带的卫星定位模块,准确地对重要物资进行定位、寻找、管理和高效作业,有效地实现作战保障物资适时适地适量的综合运用和动态管控。

精确灵敏后勤保障是现代军事后勤建设的主要目标,包括对后勤信息的精确掌握、对后勤资源的精确输送和对后勤力量的精确运用等三个方面,达到“适时、适地、适量”的保障。这就要求利用无线传感器网络等技术驱散两个战争迷雾:一是后方资源迷雾,即后方搞不清楚自己手里有什么、有多少、在哪里;二是前方需求迷雾,就是后方搞不清楚前方作战部队需要什么,需要多少。基于无线传感器网络、移动通信、可视化等技术,建立后勤物资全生命周期管理信息系统,以实现后勤物资的自动识别、快速定位、规范分类、顺畅收/发、科学管理,实现从生产线、仓库到战场、单兵的全程动态监控与管理,最大限度地实现前方需求与后方供给的“零偏差”对接,确保后勤物资的快速、精确输送。

主动配送将成为现代后勤保障的基本方式,与传统后勤采用的坐等部队申请的被动保障模式相比,主动配送模式要求将物资生产者、战略后勤机构、战区后勤体系、负责保障的战术后勤单位、具体后勤保障人员和前线使用单位等无缝铰链起来,相互之间能够实现信息的动态交换与共享,从而能够对物资需求进行准确预测,实现主动配送。这就要求在基于无线传感器网络提供的感知能力基础上,综合运用云计算、数据挖掘、人工智能等技术,实现对海量感知数据的高效处理,提升对后勤物资信息快速、智能化分析处理的能力,为后勤物资的管理、控制和配送提供智能化的决策支持,使后勤物资的配送随时、甚至提前做出决策,极大地增强后勤行动的灵活性。

## 2.2 无线传感器网络军事应用模式

20世纪60年代,无线传感器网络就已开始应用于军事领域,但是随着无线传感器网络技术在节点微型化、网络自组织、信息协同处理等方面的飞速发展,当前其军事应用较早期发生了很大变化。为了全面探讨无线传感器网络军事应用模式,下面首先通过美国的三个应用案例回顾下无线传感器网络起源时的军事应用模式。

无线传感器网络的构想最初是由美国军方提出的,其早期的主要应用案例包括声音监测系统、分布式传感器网络和早期协同作战能力。

### 1. 声音监测系统

声音监测系统(Sound Surveillance System, SOSUS)可算是传感器网络技术首次应用于军事领域。在第二次世界大战期间,美国海军为了对付德国的潜水艇袭击,开始研制水下声音监测系统。到50年代末,贝尔实验室的研究人员研制了第一套水下听音器,

其尺寸大小与汽车的立体声器相似。以后陆续有一千多套听音器布署到海洋底部，将它们连接到岸边铺设的海底线路。该系统主要是基于海底声音传感器阵列构建，用来监视探测跟踪敌方潜艇的活动。后来，随着冷战的结束，这种原先只用于军事目的的传感器网络开始为民用服务，如用于跟踪鲸类活动、研究海底火山喷发以及侦探非法漂网捕鱼等。随着应用的多样化，研究者们不断围绕声音监测系统开展信息处理技术、无线通信技术、传感器技术等基础性研究工作，为无线传感器网络技术的发展打下良好的基础。

## 2. 分布式传感器网络

20 世纪 70 年代，美国国防部高级研究所计划署实施了分布式传感器网络(Distributed Sensor Network, DSN)项目，意图通过建立陆基的分布式声音跟踪系统来监视领空的飞行器。分布式传感器网络项目对传感器网络组成进行了技术规范和定义，并且该系统已集微电子技术、嵌入式计算技术及无线通信技术于一体，网络的传感器节点已开展微型化设计，并通过自组织网络技术实现传感器节点组网。虽然这些分布式节点之间仍可以采用有线、无线或光等通信方式，但一般认为短距离的无线低功率通信技术最适合该种网络，因此称这类网络为无线传感器网络。也是从这一时期开始，微型化的传感器系统开始引起军方的重视，并使无线传感器网络技术成为网络中心战中的关键技术。

## 3. 早期协同作战能力

1987 年，美军提出协同作战能力(Cooperative Engagement Capability, CEC)计划，该计划隶属于美军战区防御计划，主要由霍普金斯大学应用物理所担任技术指导。早期的协同作战能力系统是一个网状传感器系统，是“以平台为中心”向“以网络为中心”演进的第一种网络化系统。协同作战能力系统的感知数据来自于海基和空基雷达，通过对各类传感器数据的融合处理，形成可供各平台实时共享的空中目标一致航迹及其特征信息，以实现空中目标的高精度定位和跟踪。同时将传感器数据分发给战斗群中的每艘舰艇，形成区域内舰机综合作战能力，极大地提高区域、本地和自防御能力。

可见，在早期的军事应用中，传感器类型主要以雷达、声纳等为主，体积较大，依靠独立电源供电，能耗的问题并不突出。传感器的组网方式多采用线缆连接，不是采用目前的自组织方式，也不具有随机撒布的特性。从现在的概念来看，这一时期的应用只能算作广义上的传感器网络，但在这一时期取得的基础性研究成果有力地推动了无线传感器网络向节点微型化、网络自组织、信息协同处理的方向发展，其应用模式和应用效果极大地引起了军方的关注，并将其作为网络中心战和信息化战争中一项关键技术进行研究。正是因为如此，美国军方开始在军事领域广泛进行无线传感器网络应用研究，提出了基于无线传感器网络的情报侦察模式，自主反应模式，以及以后可能的传感器网络战模式，这些都是美军在不断尝试和优化无线传感器网络的军事应用效果。

下面结合典型的军事应用实例，详细分析各类无线传感器网络的军事应用模式。

### 2.2.1 情报侦察应用模式

情报侦察应用模式属于早期应用的升级，传感器节点正在从早期的大型化向微型化发展，组网方式由早期的固定式向自组织式发展，获取的情报更加准确全面，网络容错性更强，其主要应用领域是战场感知。

通过人工布防或者飞机抛撒方式，将携带声、光、电磁、震动和加速度等传感器的微型传感器节点布署在目标区域，通过隐蔽的、近距离的侦察方式，对目标地区作战地形、敌军部署、装备特性及部队活动行踪、动向等信息进行感知，为军事信息系统提供全面可靠的战场信息，其示意图如图 2-1 所示。

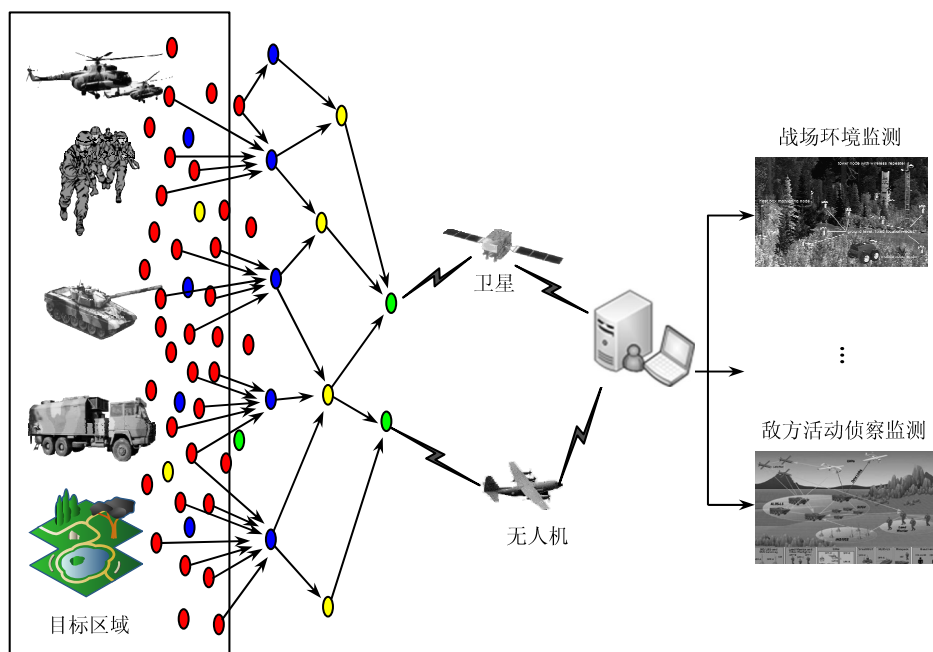


图 2-1 无线传感器网络情报侦察应用模式

可见，无线传感器网络情报侦察应用模式是利用各类传感器自主形成侦察监视网络，实现对非协作目标近距离、隐蔽式的感知监测，并通过短距离无线通信方式将监测信息发送给汇聚节点，然后由汇聚节点通过与卫星或无人机的通信将监测信息传输到后方，实现对战场地环境监测、敌方活动侦察监视的目的。

目前，基于无线传感器网络情报侦察应用模式的典型应用案例有以下两种。

#### 1. 智能微尘

“智能微尘”（Smart Dust）是由美国加州大学伯克利分校在美国国防部高级研究计划

署资助下实施,该研究小组研制出了多种低成本、低功率、毫米级大小的超微型传感器。这些超微型传感器有完整的传感器和通信系统,直径不到 10mm。

这些超微型传感器以自组织方式形成无线传感器网络,通过飞机或炮弹将超微型传感器向目标区域进行抛撒,以实现隐蔽的、近距离对目标区域的感知,不仅可用于目标环境温度、光亮度和震动等信息的监测,还可以用于感知周围是否存在辐射或存在有毒的化学物质等。同时智能微尘网络可以与无人机或卫星进行结合,将感知数据实时传输到后方处理中心,从而为破除前方战场迷雾提供实时详实的感知信息。相比传统的战场环境监测模式,智能微尘的出现和智能微尘网络的发展呈现了一种新的信息获取和处理模式。

## 2. 智能传感器网络

智能传感器网络被美国国防部定为国防部科学技术五个尖端研究领域之一,其核心思想是建立一个可实时汇聚、处理、分发海量传感器信息的智能传感器网络,目的在于不仅为指挥员还可为一线参战士兵直接提供包括气象、目标辨识、作战计划等内容的实时战场态势。

智能传感器网络是通过手动布署或飞机抛撒的方式,将多类智能微型传感器布署到目标区域,这些智能微型传感器自组织形成网络,用协作地感知、采集和处理网络覆盖的地理区域中感知对象的信息,能够综合出目标的多个属性信息。相比传统的远距离、大范围战场环境探测手段——卫星和雷达,智能传感器网络提供了一种“零距离”或“沉浸式”感知战场环境的应用模式,可以进行与战场位置绑定的战场环境状况的实时“快照”和精细化描述,从而有效弥补传统战场环境探测手段的不足。

可见,相比传统雷达、卫星等侦察方式,基于无线传感器网络情报侦察应用模式提供了一种全新的侦察视角,通过近距离、隐蔽式实时探测,能够以精细化方式提供目标区域敌方兵力活动、武器装备部署和战场环境状况等信息,并且无线传感器网络自定位技术可以有效实现战场感知信息与战场位置的绑定,为进一步侦察探测和精确火力打击提供基础。

最近,随着无人机、侦察机以及卫星等技术的发展,基于无线传感器网络情报侦察应用模式得到进一步深化,并已逐步开展与无人机、侦察机、卫星、雷达等远距离监测设备和常规探测技术的结合,形成了集宏观与微观、长期与实时、移动与定位为一体的情报侦察应用模式,实现了对战场物理环境从宏观尺度到微观尺度的“全维无缝”感知。正是因为如此,世界各军事强国都在广泛研究基于无线传感器网络的情报侦察应用模式,将此视为战场态势感知技术的一次革命性飞跃。

### 2.2.2 自主反应模式

伴随着无线传感器网络技术的发展和演进,自主反应应用模式也已经出现。在自主

反应模式中,无线传感器网络不仅能实时监测战场环境,而且还能根据环境自主做出反应。可见,在这种模式下已经将无线传感器网络的用途拓展到了火控、武器制导等方面。因此,自主反应模式的本质特征在于,无线传感器网络在军事斗争中扮演的角色开始从传统的侦察保障型装备向进攻杀伤型武器演化,已经开始具备攻击毁伤的能力,这是自主反应应用模式与情报侦察应用模式本质的区别。

通过在战争核心地带部署携带具有攻击性武器的传感器节点,由这些传感器节点以自组织方式形成网络,实时协同感知监测区域是否有敌对目标如车辆、人员等出现,当无线传感器网络探测到敌对目标,可以将感知信息发送给指挥中心请求武器打击,也可以根据我方设定,自动对敌方目标进行攻击,真正实现“从传感器到射手”的自动感知→数据传输→指挥决策→火力控制→信息反馈的全过程。基于无线传感器网络的自主反应应用模式如图 2-2 所示。

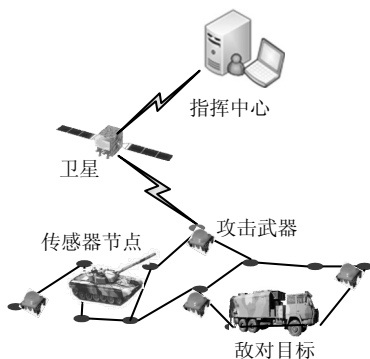


图 2-2 无线传感器网络自主反应应用模式

目前,基于无线传感器网络自主反应应用模式的典型应用案例有以下两种。

### 1. 基于无线传感器网络的智能雷场

智能地雷是具有广域、自动寻找目标的第三代地雷,与传统地雷相比,它结合了传感器探测技术、无源定位技术和自寻的技术,通过传感器采集的信号区分目标类型,并对目标进行精确定位后主动实施攻击,即能够主动、准确地探测跟踪目标并实施攻击。国外从 20 世纪 60~70 年代就投入大量的人力和物力进行研究,如美国 AHM 反直升机地雷、法国的 Mazac 声控反坦克地雷。特别是随着无线传感器网络在军事领域的应用,为智能雷场构建提供了技术基础。

基于无线传感器网络的智能雷场主要用于反击武装直升机和坦克等进攻性武器,可以人工布设,同时也可以借助于飞机或火箭进行自动布撒。目前,自动布撒地雷日益成为布设方式发展的主要方向,因为该种方式不仅可以快速布设,而且还可以利用无线传感器网络的自组网、自动探测,自动自定位等功能实现对雷场布设的调整和控制。

基于无线传感器网络的智能雷场工作流程包括：当地雷利用火箭或飞机空投自动布撒到所需地域，触地后接通地雷电源，由于是自动布设，布设地雷节点的位置不能预先精确设定，节点之间的相互邻居关系预先也不知道。因此首先要构建无线传感器网络，建立网络时间同步，发现网络拓扑，进行网络节点定位等，自动形成无线传感器网络系统。利用无线传感器网络的时间同步，雷场的地雷在数秒内实现与无线传感器网络的时间同步，同时确定各个地雷相对位置及其坐标系，进入“值守”状态。当有目标“入侵”激励时，传感器节点按同步顺序发送本节点采集到的目标信息，并接收雷场内其他传感器节点采集到的数据，实现整个雷场传感器信息和地雷状态信息的交换。然后进一步对目标进行检测、定位并分类识别及航迹跟踪，并做出决策判断，引导地雷中的战斗部随动瞄准并打击。

可见，基于无线传感器网络的智能雷场是一种典型的自主反应应用模式，通过无线传感器网络实现了雷场的自动感知、决策判断和主动打击。

## 2. 枪声定位系统

枪声定位系统被誉为“狙击手的狙击手”，目前已得到世界各国的关注。枪声定位系统是无线传感器网络自主反应应用模式的典型实例。目前，枪声定位系统主要分为固定式和头戴式两类。

其中，固定式枪声定位系统采用低功耗的无线传感器节点进行组网，通过传感器节点监测狙击步枪的枪口冲击波和弹丸飞行产生的震荡波，然后传感器节点将数据发回到基站，最后由基站将收到的来自多个传感器的数据进行融合，计算出射手位置。

可见，固定式枪声定位系统是一种典型的自主反应应用模式，它使用了若干个传感器节点，这些节点能够通过手工或者其他方法进行配置。一旦被部署，它们就会自组织形成通信网络，并进行自定位，确定时间基准，完成使用前的准备。不论何时，只要事件被探测到，到达时间就会被确定，并通过具有数据聚合和路由服务功能的网路传送到基站，以精确计算出射手位置，并进行自动还击。在伊拉克战争中，为应对巷战中伊拉克的狙击手，美军使用了枪声定位系统进行自动还击。同时，固定式枪声定位系统也被许多国家应用于城市反恐。

头戴式枪声定位系统是以安装在头盔上的感知设备作为无线传感器节点的枪声定位系统，包括一个麦克风阵列用于声音的探测，一个通信板用于节点间的通信，一个处理板用于枪声位置的估计算法，一个三维的罗盘用来提供自己的方位。头盔式枪声定位系统从广义上讲也是一种自主反应应用模式。

可见，基于无线传感器网络的自主反应模式，将前端感知、信息传输、指挥决策和火力控制进行了高效的融合和集成，实现了“发现即打击”的目的。随着无线传感器网络技术、智能武器以及物联网技术的进一步发展，基于前端信息感知的自主反应应用模



式将成为武器装备控制模式的重要发展方向。

### 2.2.3 传感器网络战模式

随着技术的发展和无线传感器网络应用的演进,无线传感器网络军事应用模式已从情报侦察获取模式,逐步向具有攻击毁伤能力的自主反应模式演进。

从未来军事斗争的发展来看,敌我双方对信息的争夺至关重要,谁取得了制信息权也就占有了主动权。无线传感器网络由于其独特优势,可以有效弥补传统侦察、探测手段的不足,必将会成为未来军事斗争中获取信息的主要手段。可以预见,未来战场将会布满各种可快速部署的传感器,包括气象传感器,生理感知传感器,震动、声音与磁场传感器,以及探测化学和生物制剂的传感器,甚至还有电视摄像机、激光雷达、成像雷达、热摄像以及多频谱成像仪等可视传感器装置。因而,实施以无线传感器网络为攻击目标,以攻击、干扰和破坏其网络信息系统为目的的网络攻防行为,是保护我方人员和网络信息系统的有效手段,将成为未来战争信息争夺中的主要军事行动。

攻击传感器网络的形式多样,并不局限于物理损毁,还包括向无线传感器网络中注入病毒、制造虚假信息和恶意传感器潜入等。攻击无线传感器网络的武器,不再仅仅是炸弹等爆炸性武器,还将包括攻击型传感器网络。由此可以预见,随着信息争夺日趋白热化,未来以对方无线传感器网络为攻击目标,以无线传感器网络为攻击武器的传感器网络战,将成为无线传感器网络的下一代军事应用模式。

传感器网络战应用模式相比现有的情报侦察模式和自主反应模式,本质特征在于:在传感器网络战中,无线传感器网络成为进攻杀伤型武器,并以敌方无线传感器网络作为主要攻击目标。实现传感器网络战应用模式,需要以下三个关键技术。

#### 1. 无线传感器网络配置技术

在传感器网络战中,首先需要解决的是如何有效、合理、快速地部署传感器以组成一个能够满足实际作战需求的无线传感器网络,也即是网络的配置问题。这其中包括:

① 传感器网络的规划与设计,即按照作战意图,全面考虑约束条件,开展网络需求分析、物理设计和逻辑设计等,输出网络的详细设计方案,并给出侦察型、攻击型传感器等不同类型传感器的选配方案;② 传感器网络的部署,即依据网络的规划与设计,综合战场地理、气象及传感器的防水、抗冻和抗震等工作性能,制定最佳的投放方法来部署传感器,尽可能地保证传感器在投放后所组成的实际网络与规划设计阶段给出的目标网络一致。③ 传感器网络的自组织技术,即随机抛撒的传感器能够按照传感器网络的规划和实际投放的情况,自动调节,形成可满足应用功能的自感知、自配置和自管理的容错性网络。

## 2. 无线传感器网络的捕获与反捕获技术

传感器网络战是以对方的无线传感器网络为攻击目标。因此，如何捕获对方的无线传感器网络，同时防止我方的无线传感器网络被捕获就变得非常重要。

随着传感器技术的发展，传感器外型越来越小，功率越来越低，用普遍使用的卫星照相、红外探测等手段很难将其发现。针对对方不同用途的无线传感器网络所具有的不同特征，我方有针对性地部署传感器网络作为搜索工具，利用信号检测、模式识别等方法来捕获对方无线传感器网络将是一种新的技术途径。同样，如何更好地隐藏我方的无线传感器网络，防止被对方捕获也同等重要，这依赖于网络反捕获技术的发展。

## 3. 无线传感器网络的攻击与防护技术

在捕获对方无线传感器网络之后，我方以无线传感器网络作为攻击武器，对对方网络开展攻击行动。可采用的网络攻击手段分为三类：① 网络入侵，即利用对方无线传感器网络的漏洞或通过破解网络，进行病毒注入，使对方无线传感器网络在正常工作状态下做出错误判断，也可以欺骗对方的战场情报，此外还可以使病毒发作，造成网络瘫痪；② 网络干扰，即在无法侵入对方网络的情况下，我方无线传感器网络也可以通过信号压制、散布虚假信息等方式干扰对方无线传感器网络正常工作；③ 网络损毁，即在网络入侵和网络干扰均失效的情况下，我方无线传感器网络可以选择性自爆传感器节点，以破坏对方无线传感器网络中的关键节点，达到损毁对方网络的目的。

总之，随着信息化战争的不断演进和网络争夺的加强，以对方无线传感器网络为攻击目标，以无线传感器网络为攻击武器的传感器网络战，极有可能成为未来战争的一种重要新形式。同时，对传感器网络战应用模式的研究和发展，也必将推动无线传感器网络技术本身的发展。

## 2.3 无线传感器网络军事应用体系架构

体系架构在无线传感器网络设计中非常重要，特别是对于军事应用而言。由于无线传感器网络具有自组织、分布式控制、动态拓扑以及节点能量、计算、存储和通信能力受限等特征，使得无线传感器网络体系架构的设计至关重要，并在很大程度上对网络的性能和生存时间产生重大的影响。无线传感器网络体系架构设计包括传感器节点架构、网络架构和协议架构的设计及体系架构设计的准则。本节结合无线传感器网络军事应用特征，考虑传感器节点在能量、计算、存储和通信方面的限制，介绍了无线传感器网络军事应用中传感器节点架构、网络架构、协议栈架构以及体系架构的设计准则。

### 2.3.1 传感器节点架构

传统的无线传感器节点通常由感知模块、处理模块、通信模块、能量模块四个模块

组成。但是在军事应用领域, 为了实现特定的功能, 通常需要添加辅助模块, 如为了使无线传感器网络具有自主攻击、移动等执行功能, 在传统传感器节点架构上增加执行模块; 为了实现对目标环境的视频图像感知, 提供目标环境多分辨率的描述, 增加视频模块; 为了实现无线传感器网络与无人机或卫星的通信, 增加额外的数据透传模块。传感器节点架构如图 2-3 所示。

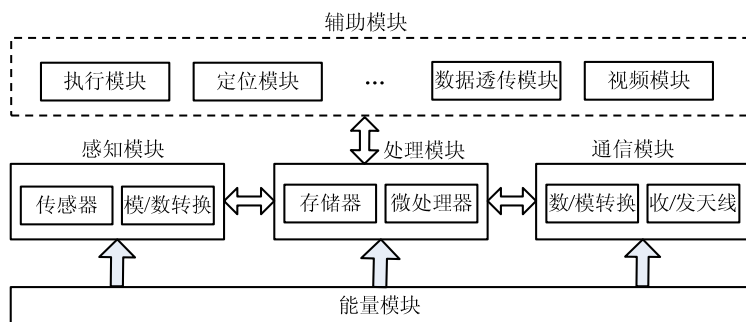


图 2-3 传感器节点架构

传感器节点架构中, 感知模块由一个或多个传感器以及模/数转换器组成, 传感器负责感知监测目标的物理特征和现象, 如光强、温度、压力、加速度和声音等, 模/数转换器负责将模拟信号转换为数字信号, 并且对于军事应用而言, 模/数转换部分还包括对原始数据的滤波、放大等信号处理工作。有时为了满足军事应用感知模块微型化的要求, 在选择传感器时, 通常会优先选择 MEMS 传感器、压电式传感器或者无源传感器等。

处理模块是传感器节点的计算处理核心, 承担传感器采集控制、任务调度、能量计算、功能协调、通信协议和数据整合等功能, 主要负责整个传感器节点的控制和管理。其核心组成部分是微处理器和存储器, 不过为了满足军事应用需求, 处理模块有时还需要包括微处理自毁单元和高精度的时钟单元, 以及电源监控单元等。

通信模块主要由数/模转换和收/发天线组成, 负责接收、发送数据和控制信息。由于通信模块能耗是无线传感器节点的主要能耗单元, 因此进行架构设计的过程中, 需要结合实际应用需求来设计天线单元的大小, 以满足实际通信距离要求。同时天线布局等也关系到无线通信距离和收/发信号的质量, 因此在满足军事应用需求的同时要尽量合理化布局天线。

能量模块负责为传感器节点运行提供能量。在军事应用, 无线传感器网络通常部署在环境恶劣的战场, 传感器节点的能量单元是不可能替换的, 因此这就要求能量模块可以满足无线传感器网络数天、数月工作的需求。正因为如此, 应用于军事领域的传感器节点能量模块通常包括自供电单元, 主要利用震动、光照等自然能量对能量模块进行充电, 以保证实际应用需求。

辅助模块是传感器节点可选的支持性模块, 不过在军事应用领域, 如定位模块、数

据透传模块、执行模块和视频模块通常是必需的单元。特别是在无线传感器网络自主反应应用模式下，需要对传统的传感器节点功能进行扩展，以满足军事应用目的需求。

### 2.3.2 网络架构

在军事应用领域，无线传感器网络通常是采用飞机空投、火炮发射的方式进行部署，也存在部分无线传感器网络通过人工布设的方式部署。在整个网络中通常由大量传感器节点和一个或多个汇聚节点组成，其中传感器节点负责完成对目标区域的监测，汇聚节点辅助向监测区域内的传感器节点发送查询消息或者指令。同时汇聚节点还可以作为连接外接传输网络或单元（如卫星网、无人机）的网关，收集网络中各个传感器节点的数据，并对数据进行相应的处理，然后将处理后的数据通过卫星网或无人机传送到指挥中心或者监控中心。

在无线传感器网络军事应用中，为了满足不同目标区域如要道、桥梁、重要关口或者海岸线、甚至密林等侦察感知需求，需要无线传感器网络采用不同的网络架构以满足不同应用需求。总结和梳理存在的网络架构，可以分为两大类：单跳网络架构和多跳网络架构。其中单跳网络架构较为简单并易于控制，适合在一些小的区域内部部署少量传感器节点的应用场合；多跳网络架构应用范围广泛，但是网络架构复杂，部署和管理成本也相对较高。

#### 1. 单跳网络架构

在某些自主反应军事应用模式中，由于对感知信息传输的实时性、可靠性要求比较高，无线传感器网络的多跳传输很难满足应用需求，这时通常采用单跳网络架构在目标区域部署无线传感器网络。各个传感器节点采用单跳的方式将各自的数据直接发送给汇聚节点，由汇聚节点进行融合处理，并进行决策判断，向网络中传感器节点下达控制指令。无线传感器网络单跳网络架构如图 2-4 所示。

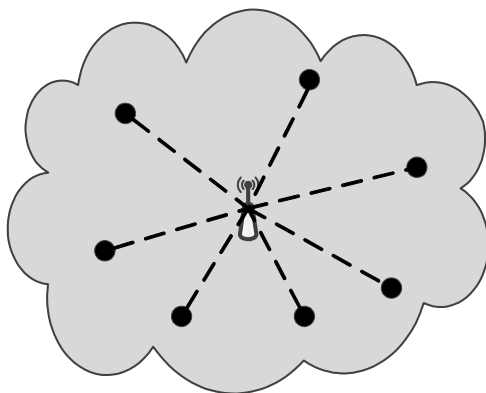


图 2-4 无线传感器网络单跳网络架构

然而,在无线传感器网络中,传感器节点用于通信能耗的能量比感知和处理所消耗的能量多得多。例如,向100m远的接收器发送1b数据所消耗的能量大约等于执行3000条指令所需要的能量。而且,随着通信距离的增加,所需的发射功率呈指数型增长,因此无线发送所消耗的能量通常占所消耗能量的较大部分。因此,为了满足能量消耗需求,单跳网络架构的无线传感器网络通常用于覆盖范围相对较小的监测区域,如核心区域或交通要塞的实时监测,实现较高的实时性和可靠性。

## 2. 多跳网络架构

针对大区域目标监测,传感器节点要进行大规模抛撒,为了降低通信能耗和实现网络的动态可扩展特性,通常采用多跳网络架构和短距离通信方式实现数据传输。在多跳网络架构中,传感器节点通过一个或多个网络中间节点将所采集到的数据传送到汇聚节点,从而有效地降低通信所需的能耗,如图2-5所示。多跳网络架构又分为平面型架构和层次型架构。

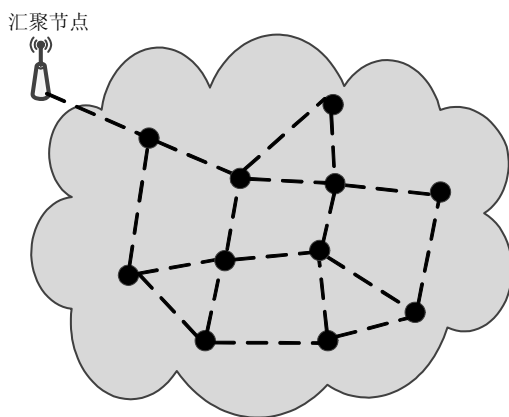


图 2-5 无线传感器网络多跳网络架构

### 1) 平面型架构

平面型架构是一种简单的多跳网络架构,在平面架构中,传感器节点在组网过程中所起的作用是相同的,所有传感器节点的地位也是相同的,具有完全一致的功能特性。由于一个无线传感器网络所部署的传感器节点数量通常比较大,不可能为每个传感器节点分配一个标识符。因此,在无线传感器网络中,数据采集是以数据为中心的,汇聚节点采用泛宏的方式向指定的区域内的所有节点发送查询消息,只有那些具备所查询数据的传感器节点才响应汇聚节点,每个节点通过多跳路径与汇聚节点进行通信,并使用网络中的其他传感器节点进行中继传输。

平面型网络架构在情报侦察模式中应用较多,通过飞机或炮弹抛撒的方式,将大量具有相同功能的微型化传感器节点在目标区域进行布撒,以冗余的方式形成密集型网络,

对目标区域进行军事侦察，并将感知信息存储在自身存储器内。当汇聚节点下发查询指令时，各个传感器节点再将自身所感知的信息传输到汇聚节点。平面型网络架构的突出优点是网络的容错性比较好，当一个或多个传感器节点被摧毁或破坏时，整个网络仍具有较好的连通性，特别适合对环境比较恶劣的前沿战场环境侦察监测；其缺点是为了保持网络具有较好的容错性，传感器节点部署的密度通常比较大。

## 2) 层次型架构

层次型架构分为上层和下层两个部分，如图 2-6 所示。上层为簇头节点构成的网络，含有相同的 MAC、路由、管理和安全等功能协议，具有汇聚功能；下层为普通节点，它们一般不具备上层节点的上述功能。网络以簇的形式存在，簇头负责管理其内部普通节点（又称成员节点），普通节点负责对目标环境进行感知。这种网络拓扑结构冗余性较好，能够提高网络可靠性，但普通节点间一般不能直接通信。

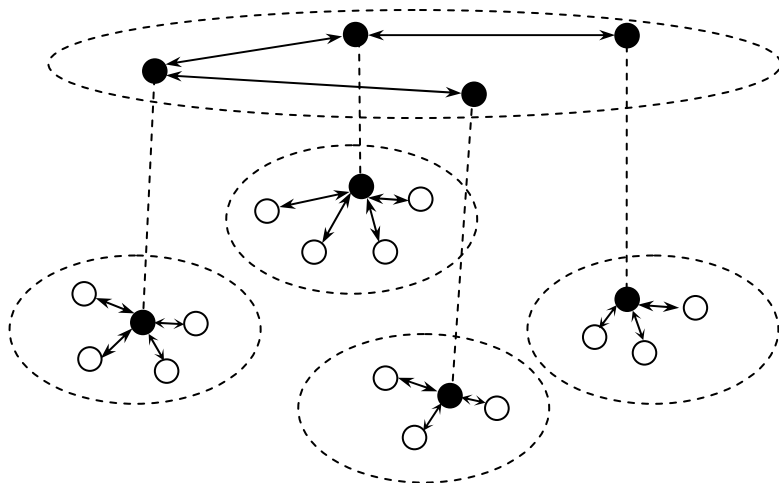


图 2-6 层次型架构示意图

基于分簇的层次型网络架构不仅能够降低通信的能耗，而且能够平衡传感器节点间的业务负载，并提高网络的可扩展性，更好地适应网络规模的变化。如果传感器节点具有相同的能量或传输能力，则网络需要周期性进行分簇，才能更好地平衡各个传感器节点间的业务负载。此外，采用分层结构可以在簇头节点进行数据融合，减少了向汇聚节点发送的数据量，从而提高网络的能量效率。

由于层次型架构的诸多优点，层次性网络架构被广泛应用于军事领域，特别是对陆战场感知领域。无线传感器网络通过人工布设、飞机空投、火炮发射等方式，随机密集地布设在战场需要侦查监视的区域。侦察监视区域可以是一个很小范围，如一条敌人可能通过的要道、一座桥梁、一个重要关口，也可以是敌方阵地的一个纵深区域或可能的

进攻路线。各节点自主分簇，推举的簇头通过单跳或多跳方式与隐蔽的汇聚节点相连，形成层次型网络架构。它以无人值守的方式实现对敌方武装人员、轮式车、履带车、超低空飞行器等目标的昼夜监视，可及时发现敌军的活动信息，并将这些信息通过网络传送到远端的指控中心，为我军的作战行动和指挥决策提供依据。基于陆战场侦察监视应用的层次型架构的典型应用如图 2-7 所示。

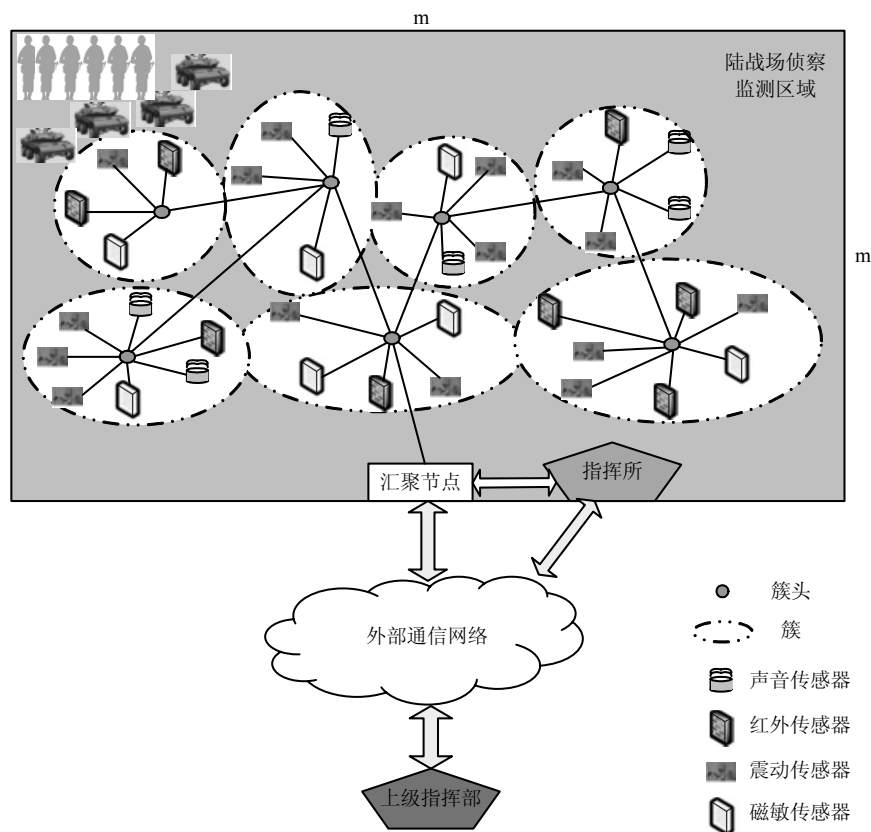


图 2-7 基于陆战场侦察监视应用的层次型架构的典型应用

图 2-7 中侦察监视区域示意为  $M \times N \text{ m}^2$  范围区域，密集布设了多种类型传感器，如声音、震动、磁敏、主动红外和被动红外传感器等。其中虚线圈表示自组织形成的各簇，每个簇有一个簇头，簇内成员节点与簇头星形连接并交互信息，簇头对信息进行融合处理并通过单跳或多跳将信息汇聚到汇聚节点。通常，在中小规模应用情况下，只设置一个汇聚节点，大规模复杂应用情况下可设置多个汇聚节点。指挥所通过外部通信网络与汇聚节点连接，实时掌握陆战场监测区域内的态势信息，以辅助做出决策。有时前沿指挥所与汇聚节点布置在同一位置，则汇聚节点可通过有线方式与侦察监测平台相连。

2.3.3 协议栈架构

协议栈是传感器网络节点软件部分的重要组成部分，传感器网络协议负责通过协调网络中部署的网络节点，形成连通的数据通信网络。参考开放式系统互连网络参考模型（Open System Interconnect，OSI），结合无线传感器网络军事应用需求以及无线传感器网络组织构成、规模及特点，设计了一种层次式无线传感器网络协议栈架构，如图 2-8 所示。

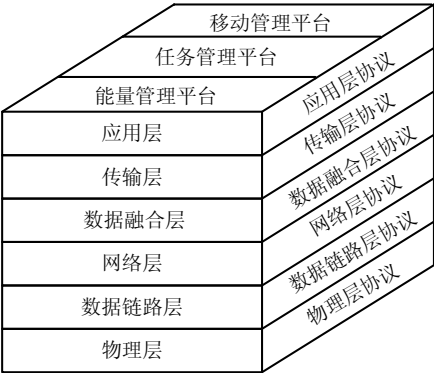


图 2-8 层次式无线传感器网络协议栈架构

层次式无线传感器网络协议栈架构由下至上分为物理层、数据链路层、网络层、数据融合层、传输层和应用层等六个层面，同时包含了与网络协议有关的能量管理平台、任务管理平台和移动管理平台。

其中，物理层负责信号在物理媒体上的传送，包括频率选择、信号调制解调、编/解码、发送与接收信息等；数据链路层负责数据流的复用、数据帧的发送与接收、媒体接入及差错控制等；网络层负责为来自传输层的数据提供路由；数据融合层负责消除传感器测量冗余，并将多个传感器/多个信息源数据组合起来，在获得比单传感器更多信息的同时，以减轻无线传感器网络中的通信复杂度、降低通信能耗，提高带宽利用率；传输层负责应用层所要求的可靠数据的传输；应用层包括各种应用协议，主要面向各种不同的无线传感器网络的军事应用。

层次式无线传感器网络协议栈架构中的能量管理平台负责管理传感器节点用于监测、处理、发送和接收所需的能量，它可通过在各个协议层使用高效的能量管理机制来实现。对于无线传感器网络的军事应用，特别需要高效的能量管理机制，如在数据链路层，可以设计当没有数据发送和接收时，传感器节点可以关闭其发送和接收器以节省能量；在网络层，传感器节点可以尽量选择剩余能量高的相邻节点作为下一跳传输节点。任务管理平台负责监测区域内各传感器节点间的任务分配情况，以提高传感器节点的任务执行能力，并兼顾节点的能量效率和延长网络的生命期。由于在军事应用中，传感器节点通常密集部署在某个特定区域，在执行侦察监视任务时有冗余，并非需要区域内所



有传感器节点都同时执行同一个任务，因此需要使用一个灵活的任务管理机制在多个节点之间进行任务分配。移动管理平台负责在网络拓扑发生变化时的传感器节点的重组，特别在无人值守的军事应用中，能够较好地实现网络的覆盖性和可扩展性。

### 2.3.4 体系架构的设计准则

根据无线传感器网络军事应用要求，在无线传感器网络军事应用体系架构设计中需要重点考虑以下六个设计准则。

#### 1. 抗毁性

抗毁性是指无线传感器网络在战场等恶劣环境下能够主动应对恶意破坏网络的行为，并具有一定的抵抗力。抗毁性对网络所提出的鲁棒性要求高于传统无线传感器网络所要求的可靠性。特别是在前沿战场阵地、敌后战场等目标区域应用中，由于传感器节点所布设区域的物理安全往往无法得到有效保证，网络随时面临传感器节点被破坏，以及网络中存在敌方投放的恶意节点干扰等情况。如何通过网络容错性设计，保证网络在面临恶意破坏时能够最大限度地减少破坏对网络军事应用所造成的负面影响，是设计特定应用网络架构时需要考虑的重要问题。

#### 2. 安全性

对于无线传感器网络的军事应用，其安全性至关重要。无线传感器网络的安全性，与传统网络安全性类似，主要解决数据的机密性、私有性、完整性、实时性和可认证性等问题。特别是数据的机密性和私有性，对于绝大多数军事应用都尤为重要。同时，也需要考虑敌对分子利用虚假节点向网络中注入欺骗信息或虚假信息，因此在网络安全设计的过程中即要考虑采集、传输的数据不被敌对分子所获取，也要防止敌对分子发送虚假消息破坏数据的准确性。无线传感器网络军事应用安全性设计的重要性要求把安全因素的考虑贯穿于网络各个层次协议的设计过程中。

#### 3. 可靠性

由于无线传感器网络节点能量及计算能力的有限性、无线信道的不稳定性以及应用环境的特殊性等原因，导致在无线传感器网络军事应用中节点的故障率往往高于传统节点。因此，在网络设计过程中，应着重避免因个别节点故障而导致整个网络失效的情况，以保障网络的可靠性。同时，在军事应用中，可靠性还要求网络必须在生命周期内保证完成使命任务和服务质量等。设计或选择与实际军事应用相适应的网络结构和协议，提高网络的可靠性是网络设计中的关键问题。例如，在设计平面型网络架构时，应当注意避免热区的出现，即少数节点承担过多转发任务的情况。在基于分簇的层次型网络架构中，由于簇头节点往往不可避免地承担过多的通信和计算开销，因而在设计协议的过程

中应该注意协调分担其负载。

#### 4. 可扩展性

可扩展性是指无线传感器网络应该能够随着网络规模、业务规模以及任务规模等增长而表现出稳定的性能,因此对于任务并不明确的军事任务,无线传感器网络的可扩展性十分重要。网络规模的扩张通常可能使得同一任务所需的处理和计算开销增加,业务规模的增长将使得资源分配的优化难度加大。因此,针对军事任务需求,设计合理的网络体系架构能够更好地适应不同作战任务的要求。

#### 5. 能量高效性

无线传感器网络军事应用中,传感器节点电池是无法替换的,但是大多数军事应用又要求网络在无人值守的状态下昼夜监视,也就使得能量问题成为制约无线传感器网络军事应用的主要问题之一。因此,在无线传感器网络体系架构的设计过程中,应当在保证网络可靠性、安全性等前提下,使得网络具有更高的能量效率。

#### 6. 可互通性

可互通性是指无线传感器网络与各种网络的互通操作能力。在无线传感器网络军事应用中,单独的无线传感器网络往往不能满足实际应用需求,其存在通常仅以收集数据为目的,而其所收集的数据需要通过无人机、卫星等其他设备进行转发。因此,这就要求无线传感器网络必须与其他网络具有良好的互通性,特别是与军事应用中的数据链具有良好的互通性。在无线传感器网络体系架构设计过程中,应该为无线传感器网络设计逻辑良好的网关,为实现不同网络之间的通信提供保证。

## 2.4 无线传感器网络军事应用技术架构

基于无线传感器网络军事应用的体系架构,可将无线传感器网络军事应用的技术架构分为物理感知技术、通信传输技术、应用支撑技术和安全管理技术四个层次,如图 2-9 所示。

### 1. 物理感知技术

各类传感器技术是无线传感器网络物理感知技术的核心,是无线传感器网络对物理世界进行感知和获取目标信息的基础手段,是传感器节点的核心组成单元。

进入信息化战争时期后,伴随无线传感器网络军事应用对传感器的功能和性能上的要求,根据军事应用目的和战场环境需求,各类适应于军事应用的传感器技术获得不断进步和发展,这些进步和发展大多是基于新型传感器技术的改进和优化。最具代表性的军用传感器技术是微型传感器技术。本书在第 3 章具体介绍主要的物理感知技术及其实现。

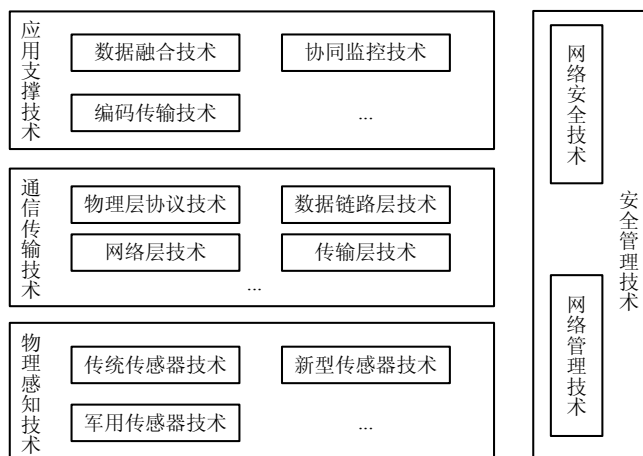


图 2-9 无线传感器网络军事应用技术架构

## 2. 通信传输技术

无线传感器网络的数据传输包括上行和下行两个方向，从汇聚节点发送到传感器节点的下行数据通常采用一对多的方式，而从传感器节点向汇聚节点发送上行数据通常采用多对一的方式。因此，为了实现无线传感器网络数据的可靠、高效、透明、快速地传输，需要对无线传感器网络通信传输技术进行良好的设计，其涉及数据链路层技术、网络层技术和传输层技术三个方面。

其中，数据链路层技术主要负责数据流的复用、数据帧的创建与检测、媒体接入、差错控制，以提供可靠的点到点和点到多点传输。在无线传感器网络的军事应用中，数据链路层技术还承担多个传感器节点合理、高效地共享通信媒体或资源，以获得满足军事应用需求的网络性能，包括能量消耗、网络吞吐量和传输延迟等方面。除此之外，为了抵抗军事应用中恶劣环境对数据传输的影响，数据链路层技术还具有差错控制功能，以实现恶劣通信环境下数据的可靠传输。本书将在第 4 章进一步介绍数据链路层所包含的核心技术。

网络层技术主要负责两方面的功能：① 寻找源节点和目的节点之间兼顾总能耗、延时等指标的优化路径；② 将感知数据沿着优化路径正确转发。可见，网络层技术的核心是路由协议，由于无线传感器网络有着不同于传统无线网络的特点，如资源有限、节点没有一个全局性的标识以及采取数据为中心的路由方式等，所以研究方法和重点与其他网络路由协议有很大不同。另一方面，从侦察监测区域发送给汇聚节点的数据具有独有的多对一业务模式，这使得当数据逐渐靠近汇聚节点时，这种多对一模式会大大增加通过某一中间传感器节点的业务量，从而导致分组的阻塞、碰撞、丢失、延迟和节点的能量消耗。因此，必须结合无线传感器网络自身的特点和应用需求，设计适合无线传感器网络应用的网络层技术。本书将在第 4 章具体介绍主要的网络层技术及其实现。

传输层技术主要负责传感器节点与汇聚节点之间可靠、透明的数据传输,负责实现拥塞控制和差错控制两项功能,以提高无线传感器网络的服务质量和数据传输的可靠性。由于传感器节点在能量、处理、存储和通信能力方面的不足,传统的传输层技术并不能直接用于无线传感器网络。另外一方面,传输层技术的设计与无线传感器网络军事应用紧密结合,如武器库管理、战场监视等不同应用需求,直接导致会有不同可靠性要求,这些都会对传输层协议设计产生较大的影响,通常在军事应用中的下行数据传输要求100%的可靠性。本书在第4章具体介绍主要的传输层技术及其实现。

### 3. 应用支撑技术

无线传感器网络是应用驱动性网络,无线传感器网络应用服务技术是对传输来的各类感知信息进行综合处理,建立起物理世界与逻辑世界的联系,为无线传感器网络的各类应用提供具体的支撑,这主要包括数据融合技术、协同监控技术和编码传输技术等。

其中,数据融合技术主要负责降低或消除网络中存在的冗余数据,提高无线传感器网络的能量效率,延长网络的生命周期。由于在无线传感器网络中存在大量节点,且传感器节点类型各异,所以测量信息会存在大量冗余,在这种情况下,如果各个节点直接向汇聚节点传输数据,将会造成网络拥塞,降低数据的传输效率,增加通信能耗。在此背景下,无线传感器网络数据融合技术应运而生,其基本思想是在网络搜集数据的过程中,利用传感器节点自身的计算和存储能力,对所采集和收集的数据进行一定程度的数据处理,以消除冗余数据,尽量降低节点所需传输的数据量,同时通过数据融合获取较单个节点数据采集更为有效、准确的数据信息,传输给汇聚节点,以达到提高收集数据准确度、提高资源利用率和降低网络能量消耗的目的。目前,针对无线传感器网络以数据为中心的特点,研究者们已提出了多种数据融合方案,本书将在第5章具体介绍主要的数据融合技术及其实现。

协同监控技术主要实现各类传感器间、多个传感器节点间,以及多个分簇网络间的协同监控。由于侦察监测目标的移动性、目标特征信息的多样性和时域累积性等特点,往往需要多种传感器和多个传感节点通过协同监控技术实现对目标的精确感知。本书将在第5章具体介绍协同监控技术及其实现。

随着图像和视频传感器的发展,将其应用于无线传感器网络已成为发展趋势,特别是随着无线多媒体传感器网络的发展,图像和视频传感器可为战场感知提高近距离多分辨率的精细化描述,因此无线传感器网络在军事应用中体现了越来越重要的角色。在此背景下,结合无线传感器网络特点,针对图像和视频传感器研究轻量型视频传输技术,已成为研究热点。本书将在第5章具体介绍视频传输技术及其实现。

#### 4. 安全管理技术

安全管理技术是无线传感器网络军事应用需要重点关注的技术。其中无线传感器网络安全技术包括信息安全技术和通信安全技术两个方面，无线传感器网络管理技术包括拓扑控制技术、时间同步技术、节点定位技术和管控技术四个方面。

管理好一个网络往往比建立网络更重要，特别是在军事应用中，由于无线传感器网络基本采用飞机或炮弹抛撒的方式进行随机部署，因此需要高效的自组织技术实现目标区域的覆盖和传感器节点间的连通；需要提供精确的位置信息和时间信息，为战场信息感知提供基础；需要构建寿命优先或性能优先等不同的管控策略，满足不同军事应用需求。本书将在第6章具体介绍网络管理技术及其实现。

安全技术是无线传感器网络军事应用的核心技术之一。由于无线传感器网络通常部署在前沿阵地或交战核心地带，其应用环境导致其极易被敌方发现和捕获，使得网络和传感器节点极易受到针对性攻击，如直接破坏传感器节点使其丧失服务能力；直接剖析传感器节点，获取敏感信息等。此外，无线传感器网络不可靠的无线通信方式、传感器节点能力和资源的有限性等都会导致无线传感器网络被攻击。本书将在第7章具体介绍安全技术及其实现。





## 第 3 章

# 无线传感器网络物理感知技术

物理感知是无线传感器网络应用中的首要环节，也是连接物理世界和信息世界的桥梁。传感器技术是无线传感器网络物理感知中最为核心的技术。传感器技术领域涉及面宽泛，学科交叉复杂，传感器可以将目标在物理世界的物理量转换为信息世界可处理的信息量，这种信息转换的有效性直接影响到后续的信息处理效果，从这个意义上看，传感器技术水平甚至可以决定无线传感器网络的军事应用成效。

本章以传感器为核心，简单介绍传感器的定义、分类和特性等基本情况，并从传感器发展创新的角度详细阐述传统传感器和新型传感器技术，在此基础上结合军事领域应用具体要求，详细分析军用传感器技术，为构建无线传感器网络的军事应用奠定最基本的技术基础。



### 3.1 概述

无线传感器网络物理感知技术的核心是各类传感器技术，它可利用传感器对物理世界进行感知，获取目标信息。

按照不同的标准，传感器有下面几种主要的分类方法。根据被测物理量分类，可分为速度传感器、位移传感器、加速度传感器、温度传感器和压力传感器等。按工作原理分类，可分为应变式、电压式、电容式、涡流式和差动变压器式等传感器。按能量的传递方式分类，可分为有源的和无源的传感器。按传感器输出信号分类，可分为模拟传感器和数字传感器。目前模拟传感器种类远远超过数字传感器。但数字传感器直接输出数字量，不需使用 A/D 转换器，就可与计算机联机，可以有效提高系统的可靠性和精确度，具有抗干扰能力强、适宜远距离传输等优点，是传感器发展方向之一。

#### 3.1.1 传感器定义

有关传感器的概念，本书给出美国仪表协会（Instrument Society of America, ISA）和中国国家标准两个相对权威和适用的定义。美国仪表协会的定义是：“传感器是把被测量变换为有用信号的一种装置。它包括敏感元件、变换电路以及把这些元件和电路组合在一起的机构。”在中国国家标准 GB/T 7665—2005《传感器通用术语》中，传感器（Transducer/Sensor）被定义为：“能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成。敏感元件（Sensing Element），是指传感器中能直接感受或响应的被测量的部分；转换元件（Transducing Element），是指传感器中将敏感元件感受或响应的被测量转换成传输或测量的电信号部分。当输出为规定的标准信号时，转换元件则称为变送器（Transmitter）。”传感器更通俗的说法是换能器、变换器，相当于人的五官功能的扩展和延伸，能够将各种外界信号变换成可以直接测量的信号。

#### 3.1.2 传感器分类

传感器种类极多，原理各异，检测对象门类繁多，因此分类方法也甚为繁杂，至今尚无统一规定。人们通常都是站在不同角度，做出突出某一侧面的分类，如按原理、按测量、按材料、按功能、按物理原理和按用途等对传感器进行分类。

##### 1. 按工作原理分类

按传感器的工作原理不同，可以将传感器分为结构型、物性型和复合型三大类，如图 3-1 所示。其中前两类已有大量商品供应市场。“结构型传感器”是利用物理学中有关



场与运动的原理构建，其性能与构成材料关系不大。该类传感器的结构几何尺寸（如厚度、角度、位置等）在待测量作用下会发生变化，利用这种变化将待测非电量转换为电信号。通常用于测量压力、位移、流量和温度的力平衡式、振弦式、电容式和电感式等传感器，均属于结构型传感器。结构型传感器开发最早，至今仍广泛应用于工业流程检测仪表中。“物性型传感器”是利用物质的某种或某些客观属性构建，其性能随构成材料的不同而异。在物性型传感器中，构成材料的物理特性、化学特性或生物特性直接敏感于待测非电量，并将待测非电量转换为电信号。由于物性型传感器的“敏感体”是材料本身，不存在“结构”，也无所谓“结构变化”，所以具有响应速度快的特点；又因为物性型传感器多以半导体为敏感材料，故容易实现小型化、集成化和智能化，具有与电子计算机接口对接方便的特点。所有半导体传感器，以及一切利用会因环境发生变化而导致本身性能发生变化的金属、陶瓷、合金和有机材料等制成的传感器，都是属于物性型传感器。“复合型传感器”是指将中间转换环节与物性型敏感元件复合而成的传感器。之所以要采用中间环节，是因为在大量待测非电量中，只有少数（如应变、光、磁、热、水份和某些气体）可直接利用某些敏感材料的物质特性转换成电信号。所以，为增加非电量的测量种类，就必须先将不能直接转换成电信号的非电量变换成可以直接转换为电信号的非电量，然后再利用相应的物性型敏感元件将其转换为电信号。可见，复合型传感器实际上是既具有将待测非电量先变换为中间信号的功能，又具有将中间信号随即转变成电信号的功能的一类敏感元器件或装置。毫无疑问，复合型传感器性能不仅与物性型敏感元器件的优劣及选用得当与否密切相关，而且还与中间转换环节设计的好坏及选用恰当与否关系甚大。

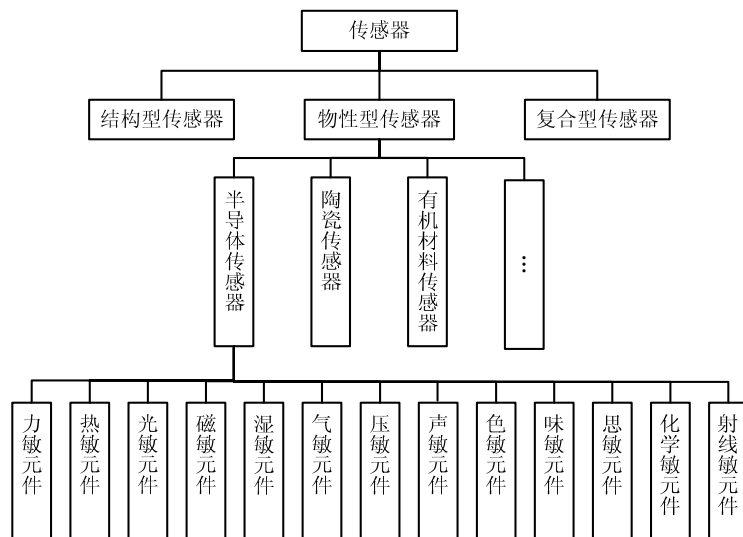


图 3-1 传感器分类体系

## 2. 按被测量分类

按被测量可以将传感器分为物理量传感器、化学量传感器和生物量传感器三大类。其中每一类传感器又可分为若干簇，每一簇又可分为若干组。按被测量分类的传感器体系图如图 3-2 所示。中国现行国家标准也是按被测量分类，这种分类无论从产品选用还是产品设计都便于统一标准。

## 3. 按敏感材料分类

按所使用的敏感材料可以将传感器分为陶瓷传感器、半导体传感器、金属材料传感器、高分子或电子聚合物传感器、光纤传感器和复合材料传感器等。

## 4. 按材料功能分类

按传感器敏感元器件的功能不同，可以分为力敏、热敏、光敏、磁敏、湿敏、气敏、压敏、声敏、色敏、味敏、视敏、思敏、化学敏、射线敏和生物敏等元件传感器。

## 5. 按物理原理分类

按传感器所利用的物理原理不同，可以分为电感式、电容式、压电式、压阻式、霍尔式、应变式和涡流式等传感器。采用这种分类法，有利于传感器专业工作者从原理和设计上对其进行归纳分析与研究。

## 6. 按能量作用分类

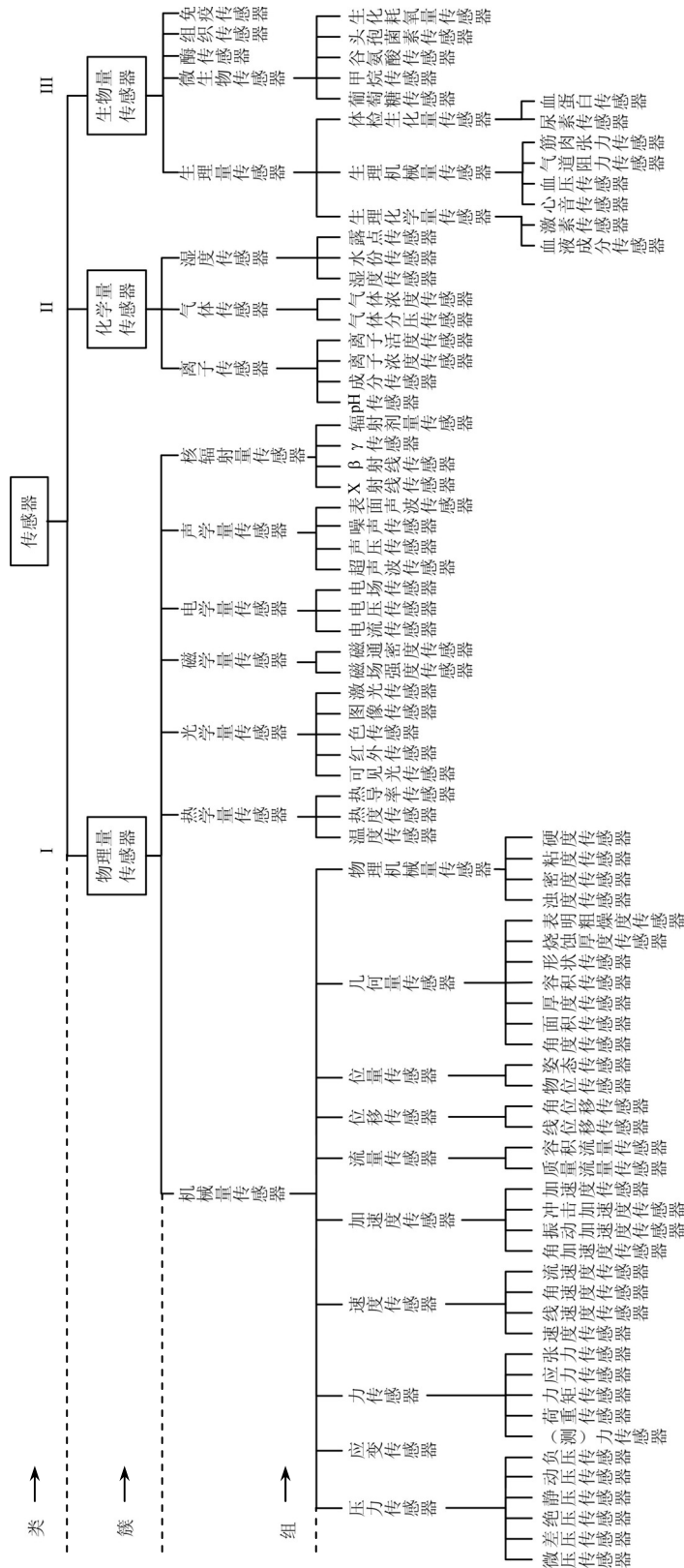
按传感器对能量所起的作用不同，可以将传感器分为能量变换型传感器和能量控制型传感器，也称之为有源传感器和无源传感器。有源传感器是一种能量变换器，它可将非电量转换为电量。无源传感器不具备能量变换能力，被测非电量仅能对传感器中的能量起到控制或调节作用，

## 7. 按使用用途分类

传感器广泛应用于国防军工、工农业生产、环境保护、交通运输、自动控制和家用电器等各个领域，从这个角度可以将传感器分为工用、农用、民用、科研用、医用、军用、环保用和家电用传感器。若按具体的使用场合，还可分为汽车用、舰船用、飞机用、宇宙飞船用、防灾用传感器等。此外，根据使用目的不同，又可分为计测用、监视用、检查用、诊断用、控制用和分析用传感器等。

## 8. 按发展趋势分类

传感器技术水平一直在进步，为了表现传感器的发展趋势，突出新型传感器的作用，可以将传感器简单分为传统传感器和智能传感器、图像传感器等新型传感器。



### 3.1.3 传感器特性

传感器是通过表达其输出量与输入量之间关系的方程, 即特性方程来检测被测信号的, 特性方程通过传感器的校准 (Calibration) 或标定来获得。传感器特性主要通过静态特性和动态特性来表达, 静态特性反映传感器输出随稳态输入量的变化规律, 动态特性反映传感器输出随动态输入量的变化规律。

#### 1. 传感器的静态特性

当输入变量为  $x$ , 输出变量为  $y$  时, 如果不考虑时间的变动, 则输入与输出关系可以表示为

$$y = f(x) \quad (3.1)$$

若不考虑自身的迟滞和温度等环境的影响, 传感器的静态特性用多项式表示为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots + a_nx^n \quad (3.2)$$

传感器在规定的精度范围内, 被测量变量  $x$  的范围为传感器的测量范围, 其最高值与最低值分别称为上限值和下限值, 上限值与下限值的代数差就是满量程 (FS), 满量程对应的  $y$  的变化量即为满量程输出变量 ( $y_{FS}$ )。衡量传感器静态特性的主要技术指标是线性度、精度、灵敏度、重复性、分辨率和迟滞等。

##### 1) 线性度

线性度是描述传感器静态特性的一个重要指标。它表示传感器实际的校准特性曲线与某一参考直线不吻合程度的最大值。常用的线性度有端点线性度 (End Point Linearity, EPL), 最佳直线线性度 (Best Straight Line Linearity, BSLL) 和最小二乘最佳拟合直线线性度 (Least Squares Best Fit Straight Line Linearity, LSBFSL)。)

对于端点线性度, 其所采用的参考直线为传感器校准曲线两端点间的连线。传感器的参考直线可以用以下表达式描述为

$$y = mx + b \quad (3.3)$$

式中,  $y$  表示传感器输出变量,  $m$  表示该参考直线的斜率,  $x$  表示被测物理量,  $b$  表示零点漂移变量。

从图 3-3 可以看出真实输出曲线和参考直线的最大偏差为  $\Delta y_{\max}$ , 因此端点线性度可以表达为

$$\pm \Delta y_{\max} / y_{FS} \times 100\% \quad (3.4)$$

式中,  $y_{FS}$  表示传感器满量程位置输出变量。

端点直线只考虑了实际标定的两个端点, 而对于其他测点的实际分布情况并没有考虑, 因此实测点对上述参考直线的偏差分布也不合理, 最大正偏差与最大负偏差的绝对

值也不会相等。为了尽可能减小最大偏差,可将端点直线平移,使最大正、负偏差绝对值相等,这条参考直线就是所谓最佳直线(BSL),那么对应的线性度,就是最佳直线线性度,如图3-4所示。

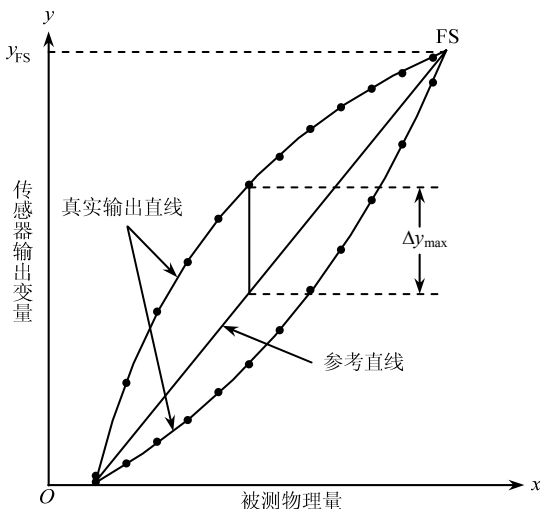


图 3-3 端点线性度

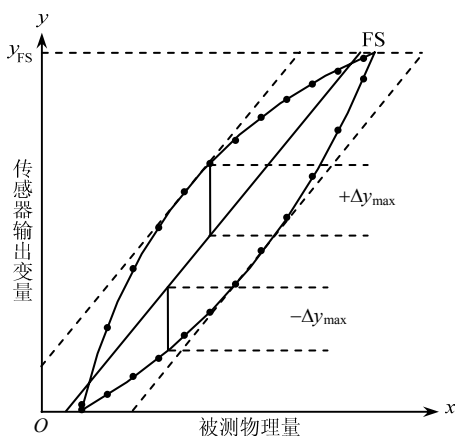


图 3-4 最佳直线线性度

但需要注意的是,在传感器的输入/输出校准曲线图中可以很容易建立最佳直线,但是当面对一系列数值时就很难建立这样的直线了。实际中需要更快、更好和更统一的方法以确定最佳参考直线。解决这个问题的方法是通过最小二乘法(Least Squares Method, LSM)拟合输入/输出数据点以确定参考直线。这是从统计的角度,以数学方式在所选择的任何范围内确定参考直线的方法,它对于计算机化的标定系统是最有价值的方法。

最小二乘最佳拟合直线(Best Fit Straight Line, BFSL)方法被大多数传感器制造商优先使用,因为它对所有数据点进行了最佳拟合,并且在常规应用中最适合计算机化的

标定系统。最小二乘最佳拟合直线方法是一种统计处理方式，并不是一种纯粹的方法，但是假若传感器的特征在设计和开发阶段得到正确的优化，并且以连续的光滑曲线表现出来，那么这种评估是有意义的和正确的。

实际上，要想获得最小二乘最佳拟合直线，必须在传感器的工作范围内获取多达 20 个校准点，并且每一个测量点的输入和输出值都将用于计算最小二乘最佳拟合直线的斜率  $S$ ，其计算公式为

$$S = \frac{\sum_{n=1}^N x_n y_n}{\sum_{n=1}^N x_n^2} \quad (3.5)$$

式中， $x_n$  为已知的输入数据， $y_n$  为对应每一个输入数据的传感器的真实输出数据， $N$  为数据点的数量。在获得最佳拟合直线的斜率以后，就可以确定所有测量点中到这条直线的最大偏移量，从而获得最小二乘最佳拟合直线线性度（如图 3-5 所示），其计算公式为

$$\pm \frac{\max |y_N - S \cdot x_N|}{S \cdot x_{fr}} \times 100\% \quad (3.6)$$

式中， $x_{fr}$  表示被测物理量的范围。必须注意的是，因为该线性度评估方法是基于传感器的整个工作范围，因此对于诸如线性可变差动变压器、差压传感器等双极性的传感器，最小二乘最佳拟合直线可能不经过零点。不过这对实际应用影响不大，因为零位输出通常可以进行电子调节。总的来说，该方法是目前最有效的方法，但是在使用时必须小心和理解其中的含义。很明显，由于其统计性，数据点的数量将对评估结果的有效性产生影响。在实际中，特征曲线越不规则，那么需要测量的数据点就越多，以考虑非线性的增加所带来的影响。

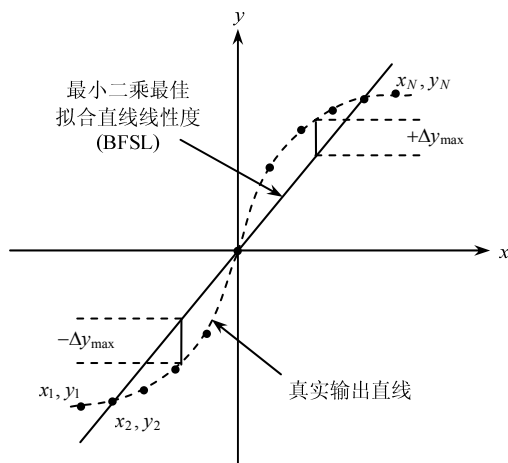


图 3-5 最小二乘最佳拟合直线线性度

## 2) 精度

对于传感器而言,精度也是一个非常重要的性能指标。简单的说,精度描述了真值和测量结果之间的接近程度,它同时考虑了所有与应用过程相关的误差源的影响。精度经常会与线性度混淆,但是实际上线性度仅仅是精度中潜在的误差源之一,虽然是比较值得注意的误差源。一个线性度为 0.1% FS 的传感器在正常工作条件下它的整体精度很容易退化到 1% FS~2% FS。事实上,在实际中,测量结果所提供的精度至少应考虑以下部分误差源,如果可能的话最好考虑以下所有误差源:线性度、重复性、分辨率、迟滞、零点温度系数、增益温度系数、长期稳定性、校准装置的误差和校准标准。很明显,精度可以根据一系列给定的操作条件进行针对性定义,但是如果希望得到更好的结果,考虑所有的影响因素是非常重要的。进一步需要记住的是,并不是所有的传感器制造商都是以完全相同的方式来定义这些参数,因此为工作任务挑选最佳的传感器是一件充满挑战的事情。通过前面关于线性度的讨论,就可以看出对于这个简单概念的具体定义,都存在明显差别。误差度对测量结果的精度正确评估会有很大影响。这些潜在的误差源主要分为两个方面,一是传感器本身的固有性能,二是校准装置本身的性能。

重复性、分辨率、迟滞三种误差因素在某些测量情况下,可以贡献高达 0.26% FS 的误差,这三种误差在后面会有详细的介绍,这里不再展开。对于给定类型的传感器,这些参数是固定的,并且不受温度的影响。下面将介绍由温度系数和校准设备所引入的误差,以及所有这些误差源对最终被测量的精度的影响。所有类型的传感器拥有两种温度误差源,一种来自于零点温度系数,一种来自于增益温度系数。有时,这两种因素可以用一个复合的系数来表示,但是这种做法并不一定就是将零点温度系数和增益温度系数简单的相加,需要记住的是这些系数的数值有可能是正的,也有可能是负的。零点温度系数表示当输入信号为零时,其输出值大小随温度的改变而改变的程度,通常用百分率全量程每摄氏度 (FS/°C) 来表示。零点温度系数受传感器的很多因素影响。比如各种机械零件的膨胀和收缩,整个电子线路中电阻、电容或者电感的改变,或对于某些传感器其磁性质的改变。进一步而言,如果传感器包含有复杂的电子元件,那么随着周围温度的改变,这些电子元件的性质必然发生改变。来自于零点温度系数的误差,对于非电传感器通常范围为 $\pm 0.001\% \text{ FS}/^{\circ}\text{C} \sim \pm 0.01\% \text{ FS}/^{\circ}\text{C}$ ,对于含有内置电子线路的传感器,通常范围为 $\pm 0.01\% \text{ FS}/^{\circ}\text{C} \sim \pm 0.02\% \text{ FS}/^{\circ}\text{C}$ 。随着温度的改变,增益系数同样也会发生改变,因此对灵敏度 (Sensitivity) 也有直接的影响。来自于增益温度系数的误差范围通常与来自零点温度系数的误差范围相当。通过对两种误差进行简单相加,对于电子传感器两者的总误差大约为 0.04% FS/°C 量级。实际中,零点温度系数和增益温度系数的复合误差范围为 0.02 FS/°C~0.03% FS/°C。这种误差在某些情况下可以通过使用特殊的补偿技术加以改善。

通常制造商很少提供传感器长期稳定性参数,但是在某些应用情况下是必须要考虑的。很明显,长期稳定性数据只能通过在特定的条件下长期进行监测获得。对于小型的相对便宜的传感器而言提供长期稳定性数据是没有必要的。实际中,长期稳定性数据主要基于制造商的长期经验,以及从设计中所使用的技术和元件的知识来获得的。很明显,传感器的使用条件的改变将增加获得长期稳定性数据的难度。一般而言,在相当温和的环境下,长期稳定性数据范围为 0.05% FS/年~1% FS/年,但环境比较恶劣时,该数值会明显提高,因此有必要对传感器经常进行校准。

校准过程常在环境温度为 20℃ 的条件下进行。通常,校准过程中存在两种误差源:

- ① 人为误差。很明显,在整个校准过程由人为因素造成的误差应该尽可能降到最低。现在在很多校准过程已经实现计算机化,因此所有计算过程是精确的,并且是保持一致的。
- ② 设备误差。校准过程的终极精度最终主要取决于测试过程的校准标准。通常认可的规范是校准设备的精度要比传感器的精度高 5 倍以上,并且对设备需要经常按照国家标准进行检查。

### 3) 灵敏度

灵敏度是指传感器在稳态下输出量增量与被测输入量增量之比,即

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (3.7)$$

显然,线性传感器的灵敏度是拟合直线的斜率;非线性传感器的灵敏度,通常也用拟合直线的斜率表示,非线性特别明显的传感器灵敏度可以用  $dy/dx$  表示,或用某一(输入量)小区间内拟合直线的斜率表示。

### 4) 重复性

重复性描述的是传感器对于同一个测点进行连续多次测量,其测量结果间保持一致的能力。对于不同测试原理的传感器,其重复性是不一样的。比如,电感式传感器和电容式传感器总是潜在地比应变片式传感器的重复性要好,通常前者大概为 0.001% FS,而后者大约为 0.05% FS。

### 5) 分辨率

分辨率是指传感器能感受到的被测量的最小变化的能力,对于现在大部分的传感器而言分辨率都比较高,它主要受相关电子线路的噪声水平限制。通常,对于诸如应变片式、电感式、电容式等大多数传感器,其分辨率都很高,可以做到 0.0001% FS,但是对于电位式、数字式的传感器会直接由设计要求决定,并且主要受位数所决定。分辨率在所有的这些精度误差源中是最少需要考虑的,因为它有明确的定义且影响很有限。

### 6) 迟滞

迟滞表示传感器在输入量由小到大(正行程)及输入量由大到小(反行程)变化期



间,其输入/输出特性曲线不重合的程度。通常,迟滞现象会在那些依赖于某种材料的传感器当中发生。对于低成本的传感器,其迟滞最差可以达到 0.2% FS。对于诸如电感式或者电容式,这些依靠位移改变的传感器,其迟滞误差一般很小,因为这类传感器在工作中无须通过某种材料来将被测非电量的转化为电信号的过程。

## 2. 传感器的动态特性

传感器的动态特性是指传感器随时间变化的输入量的响应特性,动态特性中的输入量和输出量的关系不是一个定值,而是时间的函数,它随着信号的频率而变化。传感器动态响应特性分为稳态响应特性和瞬态响应特性。稳态响应特性是指传感器在振幅稳定不变的正弦形式非电量作用下的响应特性。稳态响应的重要性在于,若在工程上所遇到的各种非电量变化曲线都可以展开成傅里叶级数或进行傅里叶变换,即可以用一系列正弦曲线的叠加来表示原曲线。因此,当已知传感器对正弦变化的非电量的响应特性后,就可以判断它对各种复杂变化曲线的响应特性了。瞬态响应特性是指传感器在瞬变的非周期非电量作用下的响应特性。瞬变的波形多种多样,一般只选几种比较典型的规则波形,对传感器进行瞬态响应的分析。常用的有阶跃响应或冲击响应。

一个动态响应特性好的传感器,其输出量随时间变化的规律,将能同时再现输入量随时间变化的规律,即具有相同的时间函数,这是动态测量中对传感器提出的理想要求,但实际上除了理想的情况外,输出量一般不会与输入量具有完全相同的时间函数。这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。探明传感器动态响应特性可以使动态误差尽可能减小,可得到真实的输入/输出关系,提高传感器的测量精度。例如,在航天航空领域里,温度变化很大,传感器应能立刻感受变化的温度,并能有效地跟踪温度变化,但由于它的热惯性而很难测得精确的温度值,所以必须提高传感器的热响应特性,才可能达到动态测温的要求。又如,在测试土壤水份的过程中,由于湿度传感器的传感滞后,当水份不足时会导致植物的干死;而水份过量也会影响植物的生长并导致其死亡。提高传感器动态特性,尽可能使动态误差降到最低限度,具有重大意义。根据产生动态误差的原因,提高传感器动态性能的方法主要是针对一些测量惯性较大的敏感元件,为缩短测量响应时间而采取的有效方法和措施,主要包括以下三种。

### 1) 从传感器机理本身改进提高的方法

从传感器机理本身改进提高的方法主要是指从传感器传感机理出发,在敏感元件的材料、制作工艺以及结构优化等方面采取适当的措施。当然从传感器机理方面来研究提高传感器动态特性不只是考虑采用一种措施,它包括几种措施的综合考虑。

(1) 选用合适的敏感元件材料和制作工艺。例如,在热电薄膜红外传感器研究中,制作工艺采用微细加工技术,敏感元件采用  $\text{PbTiO}_3$  敏感材料。当用一束波长为 970nm、功率为 800 $\mu\text{W}$  的红外光来照射传感器时,测得传感器的上升时间为 2 $\mu\text{s}$ ,比采用其他传

统技术报道的最好值  $2.3\mu\text{s}$  还要快。制作工艺方面利用微细加工技术改变化学传感器的结构, 基于参量的共振特性来改善传感器的动态特性, 理论上用这种方法设计的质量/化学传感器, 能够检测到  $1\text{e}^{-15}\sim 1\text{e}^{-16}$  的质量变化, 比普通悬臂梁质量传感器的灵敏度高出两个数量级。

(2) 综合利用敏感元件的材料、结构优化的方法。在测量膛壁表面温度技术中, 根据枪炮膛壁瞬态温度测量时所受到的瞬时高温、高压及高速气流的作用来研究表面温度传感器的结构和工作机理, 巧妙地利用薄膜热接点热惯性小的特点, 基体材料采用镍铬合金, 膜层材料采用银, 热电极材料为镍铬—镍硅, 设计了动态特性非常好的表面温度传感器。它对于改进兵器结构设计、提高武器使用寿命和杀伤威力起到了重要作用。为了提高海洋测温传感器的动态特性, 敏感元件的材料选用新型小惯性铜电阻, 对其进行时间常数、热惯性、响应速度和体积等方面的优化设计, 设计出的海洋温度传感器的时间常数  $\tau \leq 160\text{ms}$ ; 在多维力传感器研究中, 敏感单元非常多 (有时多达 24 个以上), 这时可以通过敏感位置的优化布置来提高传感器的动态特性; 在研究微型触觉传感器的敏感单元时, 采用了 E 型方膜结构, 通过对 E 型方膜结构传感器敏感单元进行的频率、振型等参数的理论分析, 有限元计算和测试等方面的优化设计, 使微型触觉传感器的动态特性有一定的提高, 促进了对微型触觉传感器的加工和应用。

通过对传感机理本身提出新方法和新结构, 采用新工艺、新材料及优化技术等, 提高传感动态性能的方法是比较基础的, 在一定程度上也是比较有效的, 因而人们在设计传感器时经常首先考虑。但要创新性地发明一种新材料, 通过改进某种工艺等来提高传感器的动态特性有时也是比较有限的, 往往花费很多精力却达不到效果。

## 2) 采用硬件电路来补偿的方法

由于通过改进敏感元件的结构和工艺制作等方法来提高传感器的动态特性的有限性, 人们开始在使用传感器的过程研究与开发中, 结合补偿电路来进一步实现对传感器动态特性的补偿。例如, 在加速度传感技术研究中, 由于微硅加速度传感器结构的固有特点, 使得它的测量上限受到很大限制, 动态测量误差也难以降低。比如, 通常在微硅加速度传感器的低频段, 传感器的输入/输出幅频特性平坦, 而在谐振频率附近出现谐振, 其输入/输出的幅值比变化大。当被测加速度的频率在谐振频率附近时, 测量误差较大。对其通常所用的解决办法是增加加速度传感器的阻尼比, 使之工作在临界阻尼状态, 或限制加速度传感器的工作频带, 一般为谐振频率的  $1/10\sim 1/5$ 。由于微硅加速度计的谐振频率都比较低, 一般为  $400\text{Hz}$ , 所以微硅加速度计的工作频带更窄, 极大地限制加速度计的使用范围。为此, 出现了一种基于传递函数理论的传感器动态特性补偿理论, 其补偿原理图如图 3-6 所示。设传感器传递函数为

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (3.8)$$

式中,  $\omega_0$  为检测系统谐振频率,  $\xi$  为系统的阻尼比。

令补偿网络的传递函数为

$$C(s) = \frac{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}{s^2 + 2\xi_1\omega_1 s + \omega_1^2} \quad (3.9)$$

则加上补偿后系统的传递函数就变为

$$H(s) \cdot C(s) = \frac{1}{s^2 + 2\xi_1\omega_1 s + \omega_1^2} \quad (3.10)$$

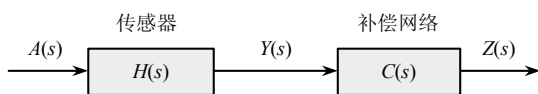


图 3-6 传感器动态性补偿原理

从上面可以看出, 经串联了补偿网络后的系统仍然为一个二阶系统, 但是它具有与原系统不同的谐振频率和阻尼比。在适当选择网络参数使  $\xi_1$  远大于  $\xi$  以及  $\xi_1$  接近临界阻尼的情况下, 就可以使得加速度计的动态测量误差在很大频率范围内得到补偿, 并使得加速度的使用频带得到展宽。

### 3) 基于软件技术的提高方法

随着微处理器技术的发展, 近年来人们又提出基于软件技术的提高传感器的动态特性方法, 这也是目前传感领域的研究热点之一。这种方法是从传感器的数学模型出发, 研究提高传感动态特性的数学控制模型及算法, 选用合理的处理器, 编制成相应的补偿控制软件, 从而实现动态特性性能的提高。

软件技术提高方法与硬件电路方法相比较, 特征在于能够充分利用软件的灵活性及经济性。算法软件实现起来的方法多种多样, 如研究动态预测法及其在提高高分子湿度传感器动态特性中的应用, 已取得很好的应用效果; 英国南安普敦大学将人工神经网络思想应用到称重传感系统中, 为了达到快速称重的目的, 在连续采集三个极值点后, 通过这三个点来预测最后的值, 连续两点的时间间隔等于阻尼周期的一半, 减少了神经元的数量, 缩短了神经网络训练和运行过程中的时间。德国埃森大学采用模糊控制算法来提高温度传感器的动态特性, 也达到了很好的效果。

对于比较复杂的系统, 用纯硬件方法和软件方法实现起来是比较困难的。例如, 在机器人腕力传感器的研究中, 常采用零极点配置方法设计动态补偿数字滤波器, 根据对传感器动态特性的要求, 确定合适的  $\omega_0$  和  $\xi$  定出补偿器的极点, 而将补偿器的零点设为传感器的极点。当载荷变化时, 传感器的极点变化, 补偿器的零极点也跟着变化。然后

将补偿器连接在传感器之后,取补偿器前一个采样周期的输出值作为负载变化的估计值,调整补偿器的零极点,实现跟踪补偿。如果用纯硬件(运算放大器、电阻和电容组)作为补偿器,虽处理实时,但参数配置和调整非常不便;而用一般的单片机实现补偿,处理时间较长。因此,可以采用数字信号处理器为核心的多维自适应动态补偿系统。这种补偿器由采样/保持器、多路转换器、高速模/数转换器、数字信号处理器、数/模转换器和 EPROM 等组成。这种方法充分发挥了 DSP 芯片特别适合于进行复杂算法的数字信号处理(如神经网络控制算法、模糊控制算法等),消除了因复杂算法进行实时动态处理的计算速度的限制。实验结果表明,经过补偿后的等效传感器系统能够迅速反映被测量的变化,转换精度高,动态性能改善较大。综上所述,基于软件技术的提高传感动态特性的方法具有成本较低、设计灵活、易于修改和实现的特点。

### 3.1.4 传感器校准

传感器校准是指明确传感器输入/输出关系的前提下,利用某种标准器具对传感器进行标定。而对新研制或生产的传感器进行全面的技术检定,称为标定;将传感器在使用中或存储后进行的性能复测,称为校准。一般标定与校准的本质相同。

传感器校准的基本方法是,利用标准仪器产生已知的非电量(如标准力、压力、位移等)作为输入量,输入到待校准的传感器中,然后将传感器输出量与输入的标准量进行比较,从而获得一系列标准数据曲线。

#### 1. 传感器校准原则

##### 1) 稳定的基准

为了达到校准的目标,校准的基准必须要有长期稳定而且精度高的基准。

##### 2) 精度的传递

对传感器进行校准,是根据试验数据确定传感器的各项性能之比,实际上也是确定传感器的测量精度。所以在校准传感器时,必须要有比被校准传感器精度更高的标准器,同时该标准器精度还必须要由比它更高精度的标准器进行定期的校准,而这个标准器则需要更高一级的标准器来校准。

##### 3) 传感器更换

有些时候传感器的校准并不容易进行,经过一定时间工作的传感器,应更换为经过校准的、满足测量精度的传感器。

#### 2. 传感器静态校准

传感器静态校准的目的是确定传感器静态特性指标,如线性度、灵敏度、滞后和重复性等,校准的关键工作是通过试验找到传感器输入/输出实际特性曲线。

### 1) 静态校准条件

传感器的静态特性是在静态校准条件下进行的。所谓静态校准条件,是指没有加速度、振动、冲击(除非这些参数本身就是被测物理量)和环境温度,一般为室温( $20^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ),相对湿度不大于85%,大气压力为( $101\,308\pm 7\,998$ ) Pa的情况。但精度较高传感器的静态校准条件在室温环境等方面有更高的要求。

### 2) 校准仪器设备

在创造一个静态标准条件之后,还要选择与被校准传感器精度要求相适应的一定等级的标准用仪器设备,即校准仪器设备,然后才能开始对传感器进行静态特性校准。

## 3. 传感器动态校准

传感器动态校准用于确定传感器的动态特性指标,对传感器进行动态校准有两个目的:一是了解传感器的动态响应特性,确定其性能指标,改进或更换传感器,或对传感器进行动态补偿,或采用能够修正动态误差的技术对测试结果进行处理;二是当传感器的静态灵敏度与动态灵敏度不同,或者传感器没有静态响应(如压电传感器)时,应对传感器进行灵敏度校准。传感器种类繁多,其动态校准的方法各异,常用校准方法有频率响应法、阶跃信号响应法和冲击响应法三种。

### 1) 频率响应法

频率响应法比较直观,精度比较高。但是需要性能优良的参考传感器,非电量振弦发生器的工作频率有限,实验时间较长。

### 2) 阶跃信号响应法

阶跃信号响应法原理是,当传感器受到阶跃被测量信号作用,测得其响应特性,用基于机理分析的估计方法或实验建模方法求出传感器的频率特性、特征参数和性能指标。

### 3) 冲击响应法

冲击响应法具有所需设备少、操作简便、输入量调整和波形控制方便的特点,目前被广泛采用。但是该方法存在输入信号不易重复,校准精度较低的缺点。

## 3.1.5 传感器发展趋势

传感器属于信息技术的前沿尖端产品,近百年来,传感器的发展大约可以分为三个阶段。首先是传统的分立式传感器(含敏感元件)阶段,然后进入模拟集成传感器发展阶段,当前正在进入以智能传感器、网络传感器等为代表的新型传感器阶段。国内外的新型传感器正逐步从模拟式向数字式、由集成化向智能化和网络化的方向发展。

由于传感器技术是当今世界迅猛发展的高新技术之一,它与计算机技术、通信技术共同构成21世纪信息产业的三大支柱技术,备受世界各发达国家的高度重视,多数国家均将传感器技术作为21世纪重点技术加以发展。

## 1. 国外传感器的发展趋势

### 1) 微型化

微电子工艺、微机械加工和超精密加工等先进制造技术在各类传感器的开发和生产中的不断普及,使传感器向以微机械加工技术为基础、仿真程序为工具的微结构技术方向发展。例如,采用微机械加工技术制作的 MEMS 产品(微传感器和微系统),具有划时代的微小体积、低成本和高可靠性等独特的优点。

### 2) 智能化

当前,智能化传感器的发展趋向于开始与人工智能相结合,创造出各种基于模糊推理、人工神经网络、专家系统等人工智能技术的高度智能传感器,并且已经在家用电器方面得到应用,相信未来的发展更有前景。

### 3) 多功能化

多功能体现在传感器能测量不同性质的参数,实现综合检测。例如,集压力、温度、湿度、流量、加速度和化学等不同功能敏感元件的传感器,能同时检测外界环境的物理特性或化学特性,进而实现对环境的多参数综合监测。

### 4) 网络化

网络传感器的开发,使测控系统主动进行信息处理以及远距离实时在线测量成为可能。

### 5) 集成化

传感器检测技术向多功能和多点检测方向发展。开发与应用新型材料,如对陶瓷、高分子、生物、智能材料等新型材料的开发与应用,不仅扩充了传感器的种类,而且改善了传感器的性能,拓宽了传感器的应用领域,像新一代光纤传感器、超导传感器、焦平面阵列红外探测器、生物传感器、诊断传感器、智能传感器和基因传感器及模糊传感器等。

## 2. 国内传感器的发展方向

随着国内工业自动化、信息化和国防现代化的发展,传感器需求量持续增长,其应用也越来越广泛,并渗透到各个专业领域。当前,中国传感器发展也紧随国际传感器发展趋势,主要呈现以下八个特点。

### 1) 微型化

微型化反映在采用 MEMS 和纳米技术两个方面:一是重视 MEMS 基本工艺的应用技术研究和专用工艺装备开发,使这些工艺在产业化生产中应用;二是应用先进的纳米级技术,使得传感器的研究在许多领域有了突破性的进展。

### 2) 智能化

借助于敏感元件中不同的物理结构或化学物质及其各不相同的表征方式,用单独一个传感器系统来同时实现多种传感器的功能。具体表现在采用硬件软化、软件集成、虚

拟现实、软测量等人工智能的方法和技术,在传感器技术和计算机技术的基础上,研究开发具有拟人智能特性或功能的智能化传感器。

### 3) 集成化

集成式微型智能传感器是世界范围内全新的研究课题,具有巨大的潜在价值和广阔的应用市场。

### 4) 多维化、多功能和模糊识别

未来的传感器将突破零维、瞬间的单一量检测方式,在时间上实现广延,空间上实现扩张(三维),检测量实现多元,检测方式实现模糊识别的多功能。

### 5) 微功耗及无源化

传感器一般都是非电量向电量的转化,工作时离不开电源,开发微功耗的传感器及无源传感器是必然的发展方向。

### 6) 网络化

传感技术与智能技术结合之后,由孤立的元器件向系统化、网络化发展,并使传感器随着无所不在的计算机网络的发展而发展。这种技术上的飞跃不仅使传感器的性能大大提高,而且将带来高额的技术附加值,创造较大的经济效益。

### 7) 高精度

随着自动化生产程度的不断提高,需研制出具有灵敏度高、精确度高、响应速度快、互换性好的新型传感器,确保生产自动化的可靠性。

### 8) 高可靠性、宽温范围

高可靠性、宽温度范围是传感器永久性的发展方向。大部分传感器的工作温度范围都在 $-20^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ ,在军用系统中要求工作温度在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ ,汽车、锅炉等场合对传感器的工作温度要求更高,而航天飞机和空间机器人甚至要求温度在 $-80^{\circ}\text{C}$ 以下或 $200^{\circ}\text{C}$ 以上。

## 3.2 传统传感器技术

传感器分类繁杂,为了更好地描述无线传感器网络物理感知技术,我们将传统的分立式传感器和模拟集成传感器统一称为传统传感器,从传统的角度进行详细描述。

传统的分立式传感器采用非集成化工艺制造,仅具有获取信号的功能;模拟集成化传感器采用硅半导体集成工艺制造,因此亦称硅传感器或单片集成传感器。模拟集成传感器于20世纪80年代问世,它是将传感器集成在一个芯片上、可完成测量及模拟信号输出功能的专用IC。模拟集成传感器的主要特点是功能单一(仅测量某一物理量)、测量误差小、价格低、响应速度快、传输距离远、体积小和微功耗等,可用于远距离测量、控制,不需要进行非线性校准,外围电路简单。传统传感器主要包括电阻式、电容式、磁电式、热电式、谐振式和气敏式等,下面予以分别介绍。

### 3.2.1 电阻式传感器技术

电阻式传感器的基本原理是将被测量值转换成传感元件电阻值,再经过转换电路变成电信号输出。其核心部分为电阻应变计(Electric Strain Gauge),也称为电阻应变片(简称应变计或应变片)。应变计的出现已有 80 多年的历史,作为一个敏感元件,其测量方法已十分成熟,广泛适用于空间、海洋和陆地等计测范围,适用结构对象包括航空、航天器、原子能反应堆、发动机、汽车和机车车辆,轨道、架线、船舶、桥梁、道路和大坝,以及各种建筑物、机场和港湾设施等。应变计适用的材料,由开始的钢铁和铝等各种金属材料到木材、塑料、玻璃、土石类和复合材料等几乎所有的材料,并且它不仅适用于室内实验和模型实验,还可在现场对实际结构或部件进行测量,这些特点是任何一种传感元件或传感器所不能比拟的。而且,随着电子技术和电子计算机技术的进步,它的应用前景也更为广泛。世界上一些先进的测试仪器生产商,如欧美大地仪器设备公司、西特传感器技术有限公司纷纷推出以应变计为核心的传感器,中国国内在原有的生产厂家基础上,又涌现出许多新的专门生产应变计的厂家,这都标志着以应变计为核心的电阻式传感器广泛的应用前景。

应变计主要由敏感栅、基底材料、粘结剂、引线和表面覆盖物五部分组成。敏感栅是结构应变转换为电阻变化的敏感元件,它是构成应变计的主要部分;基底材料用于支撑敏感栅,使得它保持一定的几何形状并使敏感栅与被粘件之间具有良好的电绝缘;而应变计的敏感栅在基底上的固定或敏感栅表面覆盖保护物时,通常均用粘结剂。另外,粘结剂也用来将应变计粘贴在被测件上,使其所形成的胶层必须准确迅速地将被测件的应变传递到敏感栅上;引线是连接敏感栅与测量仪器,用于把应变计的电信号送到仪器内;表面覆盖物则是保护敏感栅免受外界机械损伤并用于防止环境温度、湿度的侵扰。应变计的各组成元件的性能将直接影晌应变计的各项特性。

应变计的种类很多,分类的方法也很多。按敏感栅的材料来分,可以分为金属、半导体、金属或金属氧化物浆料三类;按安装方式分类,可以分为粘贴式、焊接式和涂喷式三类;按使用温度范围分类,可分为常温、中温、高温及低温四类;按基底材料分类,可以分为纸基、胶基、玻璃纤维增强基、金属基底及临时基底等。

各种敏感栅材料是应变计的关键组成元件,其性能将直接决定了应变计的特性及应用范围。目前,用做电阻应变敏感材料的主要有金属应变电阻合金、半导体材料及金属氧化物等,其形状包括丝式、箔式、薄膜和厚膜等。随着材料科学和工艺技术的发展,敏感栅材料由丝式发展到箔式、薄膜和厚膜及半导体。如今,除特殊用途外,丝式已经逐步被箔式、薄膜、厚膜等所取代。

应变计具有如下特点:

- (1) 应变输出线性较好,精度较高;



- (2) 具有长期的稳定性, 耐久性好;
- (3) 价格低廉;
- (4) 体积小, 重量轻, 使用方便;
- (5) 适用温度范围宽, 可以在特殊环境下使用;
- (6) 不仅能测量静态变量, 而且对动态和冲击都有优良的响应性。

这些特点是目前其他任何一种敏感元件所不能相比的。

### 3.2.2 电容式传感器技术

电容式传感器是利用电容器原理, 先将被测非电量转换为电容量, 进而再转化为便于测量和传输的电压或电流的一种传感器。电容传感器与其他类型的传感器相比, 具有测量范围大、精度高、动态响应时间短、适应性强等优点, 且结构简单、分辨率高、可进行非接触测量, 能在高温、辐射和强烈振动等恶劣条件下工作。目前电容式传感器在位移、压力、厚度、振幅、液位、成分分析的测量得到了非常广泛的应用, 适合在恶劣的战场环境下进行环境监控, 已成为一种很有发展前途的传感器。

由物理学可知, 两个平行金属板组成的电容器, 如果忽略了边缘效应, 其电容为

$$C = \frac{\varepsilon S}{d} \quad (3.11)$$

式中,  $\varepsilon$  是介电常数,  $S$  是面积,  $d$  是间距。

由式 (3.11) 可见, 在三种参数中保持其中两个不变而仅仅改变第三个参数, 电容就会改变。因此, 从工作原理上看, 电容式传感器可以分为如下三种类型。

- (1) 变间距型电容传感器。

如图 3-7 所示, 1 为固定板, 2 为可动板。当可动板上移  $x$ , 电容的增量为

$$\Delta C = \frac{\varepsilon S}{d-x} - \frac{\varepsilon S}{d} = \frac{\varepsilon S}{d} \left( \frac{x}{d-x} \right) = \frac{C_0}{d} \left( \frac{x}{1-\frac{x}{d}} \right) \quad (3.12)$$

所以灵敏度为

$$S = \frac{\Delta C}{x} = \frac{C_0}{d} \left( \frac{1}{1-\frac{x}{d}} \right) = \frac{C_0}{d} \left( 1 + \frac{x}{d} + \left( \frac{x}{d} \right)^2 + \left( \frac{x}{d} \right)^3 + \left( \frac{x}{d} \right)^4 + \dots \right) \quad (3.13)$$

从上式可以看出, 电容的变化量与可动板移动的位移有关, 而且当  $\frac{x}{d}$  远小于 1 时, 可以近似地认为  $\Delta C = Sx$ , 成线性关系。为了提高灵敏度可以适当减小电容器初始间距和增大初始电容值。

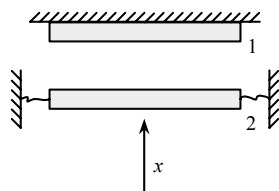


图 3-7 变间距型电容传感器

### (2) 变面积型电容传感器。

如图 3-8 所示，其中下面的极板为动片，上面的极板为定片。当动片与定片有一相对线位移时，两片金属极板的正对面积变化，引起电容量的变化。当线位移  $x=0$  时，设初始电容量  $C_0 = \frac{\varepsilon ab}{d}$ ；当  $x \neq 0$  时， $C_x = \frac{\varepsilon(a-x)b}{d} = C_0(1 - \frac{x}{a})$ ，因此  $\Delta C = -C_0 \frac{x}{a}$ ，灵敏度  $s = -\frac{C_0}{a}$ 。可见变面积型传感器是线性传感器，增大初始电容可以提高灵敏度。另外这种传感器还可以制作成其他形式，用来测角位移等。

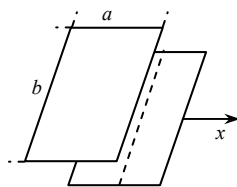


图 3-8 变面积型电容传感器

### (3) 变介电常数型电容传感器。

若在两电极间充以空气以外的其他介质，使介电常数发生变化，电容量也会随之发生变化。这种传感器常用来检测容器中液面的高度、物质的成分、湿度和材料的厚度等。

电容式传感器的应用非常广泛，凡是可以转换为间距、面积和介电常数的量都可以用电容传感器来测量，已经成为一种高灵敏度、高精度，在动态、低压及一些特殊测量方面大有前途的传感器。限于篇幅，本书就其中几个常用的电容式传感器作简要介绍。

#### 1. 电容式位移传感器

电容式位移传感器可以实现非接触测量，适用于测量各种导电材料的间隙、长度、尺寸或位置、振动和位移等。电容式位移传感器的测量原理是：构成该传感器的两个平板电极由传感器和相对应的被测体组成，当恒定的交流电加在传感器电容上时，传感器产生的交流电压与电容电极之间的距离成正比，交流电压经检波器，与一个可设置的补偿电压叠加，经放大，作为模拟信号输出。这种传感器的特点是工作时无磨损，免维修，对被测体没有作用力，具有高的零点稳定性和精度，与被测体导电性能及导电性能变化无关，而且几乎不受温度影响。

## 2. 电容式物位传感器

电容式物位传感器有两个导电极板（通常把容器壁作为一个电极），由于电极间是气体、液体或固体而导致静电容发生变化，因而可以敏感物位。它的敏感元件有三种形式，即棒状、板状和线状，其工作温度、压力主要受绝缘材料的限制。电容式物位传感器可以采取微机控制，实现自动调整灵敏度，并具有自诊断功能，同时能够检测敏感元件的破损、绝缘性的降低、电缆和电路的故障等，并可以自动报警，实现高可靠性的信息传递。由于电容式物位传感器无机械可动部分，且敏感元件简单、操作方便，因此是目前应用最广的一种物位传感器。

## 3. 固态电容式指纹传感器

个人身份的确定和权限的认定是人类社会生活的一个重要环节，尤其随着信息网络时代的到来，安全问题凸显，传统的身份识别方法在安全性、可靠性方面的不足越来越明显。随着传感器技术的发展，人们利用电容式传感器对人体不变的生物特征如指纹进行识别，可靠性大大提高，因而广泛应用于养老金领取、人事工资管理和银行柜员身份确认等很多场合。目前市场上有两种固态电容式指纹传感器，第一种是单次触摸型传感器，要求手指在采集区进行可靠的触摸；第二种则需要用手指在传感器表面擦过，传感器会采集一套特定的数据进行快速分析和认证。这两种指纹传感器都是利用指纹中凸起的部分触及传感器电容像素电极时，电容量会有所增加，从而通过检测增加的电容来进行数据采集。目前这两种指纹传感器都得到了广泛的应用。

近年来随着科学技术的发展，又出现了数字式智能化的电容式传感器，它将其测量部件技术与微处理器的计算功能相结合，使得数字式智能化传感器的综合性能指标、实际测量准确度比传统的传感器提高了很多。随着传感器技术的发展，未来电容式传感器的发展，应以非接触式为研制重点，其方向是通过广泛应用微机等高新电子技术来获得性能的进一步提高，同时还要向着小型化、智能化、多功能化的方向发展。

### 3.2.3 磁电式传感器技术

磁电式传感器又称感应式传感器、电动式传感器，它把被测物理量的变化转变为感应电动势，是一种机械能和电能的变换型传感器。它不需要外部供电电源，而且电路简单，性能稳定，输出阻抗小，又具有一定的频率响应范围（一般为 10Hz~1000Hz），适用于振动、转速、扭矩等测量。根据法拉第电磁感应定律， $N$  匝线圈在磁场中运动切割磁力线或穿过线圈的磁通量发生变化时，线圈中产生的感应电动势  $e$  的大小取决于线圈的磁通量的变化率，即

$$\dot{e} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.14)$$

式中,  $\phi$  为磁通量,  $t$  为时间, 磁通变化率与磁场强度、磁路磁阻、线圈的运动速度有关, 只要改变其中一个因素, 都会改变线圈的感应电动势。

根据工作原理不同, 磁电感应式传感器可分为恒定磁通式和变磁通式, 其中变磁通式又有动圈式和动铁式两种。动圈式采用线圈作为运动部件, 动铁式采用磁铁作为运动部件, 两者工作原理完全相同。磁电式传感器具有双向转换特性, 利用其逆转换效应可构成力(矩)发生器和电磁激振器等。磁电式传感器是目前美军大力开发的智能微尘技术中的核心部件之一。磁电式传感器可用于对地下设施进行监视和目标特征的描述。

### 3.2.4 热电式传感器技术

热电式传感器是利用转换元件电磁参量随温度变化的特性, 对温度和与温度有关的参量进行检测的装置。其中将温度变化转换为电阻变化的称为热电阻传感器; 将温度变化转换为热电势变化的称为热电偶传感器。

热电阻传感器可分为金属热电阻式和半导体热电阻式两大类, 前者简称热电阻, 后者简称热敏电阻。热电阻材料必须具有以下特点:

- (1) 高温度系数、高电阻率。这样在同样条件下可加快反应速度, 提高灵敏度, 减小体积和重量。
- (2) 化学、物理性能稳定, 以保证在使用温度范围内热电阻的测量准确性。
- (3) 良好的输出特性, 即必须有线性的或者接近线性的输出。
- (4) 良好的工艺性, 以便于批量生产和降低成本。

适宜制作热电阻的材料有铂、铜、镍和铁等。铂、铜为应用最广的热电阻材料。虽然铁、镍的温度系数和电阻率均比铂、铜要高, 但由于存在着不易提纯和非线性严重的缺点, 因而用得不多。铂容易提纯, 在高温和氧化性介质中, 其化学、物理性能稳定, 制成的铂电阻输出/输入特性接近线性, 测量精度高。

热电式传感器可用于检测和监控战场地理环境的温度和湿度情况, 以便更好地辅助指挥人员制定作战计划。例如, 不论是飞机、军舰还是火炮, 凡是需要测温、控温的系统中, 都需要采用诸如热电式传感器之类的温度传感器。

### 3.2.5 谐振式传感器技术

基于谐振技术的谐振式传感器, 自身为周期信号输出(准数字信号), 只用简单的数字电路即可转换为微处理器容易接收的数字信号。谐振式传感器的重复性、分辨率和稳定性等非常优良, 且便于与微处理器直接结合组成数字控制系统。谐振式传感器大体分为两类: 一类是基于机械谐振结构的谐振式传感器; 另一类是 MOS 环振式谐振传感器。由于谐振式传感器有许多优点, 也适于多种参数测量, 如压力、力、转角、流量、温度、湿度、

液位、黏度、密度和气体成分等，所以这类传感器已迅速发展成为一个新的传感器家族。

相对其他类型的传感器，谐振式传感器的本质特征与独特优势如下：

(1) 输出信号是周期的，被测量能够通过检测周期信号计算出来，这一特征决定了谐振式传感器便于与计算机连接，便于远距离传输。

(2) 传感器系统是一个闭环结构，处于谐振状态，这一特征决定了传感器系统的输出可以自动跟踪输入。

(3) 谐振式传感器的敏感元件即谐振子固有的谐振特性，决定其具有较高的灵敏度和分辨率。

(4) 相对于谐振子的振动能量，系统的功耗是极小量，这一特征决定了传感器系统的抗干扰性强和稳定性好。

### 3.2.6 气敏式传感器技术

气敏式传感器的主要检测方法包括利用半导体气体器件检测的电气法，使用电极和电解液对气体进行检测的电化学法，利用气体对光的折射率或光吸收等特性来检测气体的光学法。气敏式传感器按照材料可以分成两大类，一类是利用固体感测气体的干式气体传感器，另一类是利用水溶液或电解质与电极感知气体的湿式气体传感器。

例如， $\text{SnO}_2$  系气敏式元件的工作原理是，通过  $\text{SnO}_2$  与空气电子亲和性大的气体发生反应形成吸附氧束缚晶体中的电子，使器件处于高阻状态，与被测气体接触，与吸附氧发生反应，从而使元件表面电导增加，电阻减小。

再如，接触燃烧式气体传感器的工作原理是，可燃性气体与空气中的氧接触，发生氧化反应，产生反应热，使得作为敏感材料的铂丝温度升高，具有正的温度系数的金属铂的电阻值相应增加，并且在温度不太高时，电阻率与温度的关系具有良好的线性关系。

在军事行动中，气敏式传感器可用于检测有毒气体，当与网络技术相结合后还可用于远程监控。例如，美国能源部在恐怖对策项目中，可以在车站安装传感器，该传感器一旦检测到某种有害物质，就会通过网络自动向管理中心通报，自动进行引导旅客避难的广播，并封锁有关入口等。

## 3.3 新型传感器技术

伴随传感器技术以及制造工艺的发展，出现了很多新型传感器。相对于本章 3.2 节所述的电阻式、电容式、磁电式、热电式、谐振式和气敏式等传统传感器，我们将呈现微型化、数字化、网络化和智能化发展新趋势的传感器统归为新型传感器，这些新型传感器以传统传感器为基础，充分利用先进技术进行改造创新，呈现出明显的微型化、数字化、网络化、智能化等特征，从而满足各类应用的具体需求。下面重点介绍 MEMS 传感

器、数字传感器、集成传感器、多功能传感器、模糊传感器、网络传感器、模型传感器、智能传感器和图像传感器这些新型传感器技术。

### 3.3.1 MEMS 传感器技术

MEMS 传感器是利用集成电路技术工艺和微机械加工方法将基于各种物理效应的机电敏感元件和处理电路集成在一个芯片上的传感器。

MEMS 是微电子机械系统的缩写，一般简称微机电，如图 3-9 所示。MEMS 主要由微型机光电敏感器和微型信号处理器组成。前者功能与传统传感器相同，区别是用 MEMS 工艺实现传统传感器的机光电元器件。后者功能是对敏感元件输出的数据进行各种处理，以补偿和校正敏感元件特性不理想和影响量引入的失真，进而恢复真实的被测量。

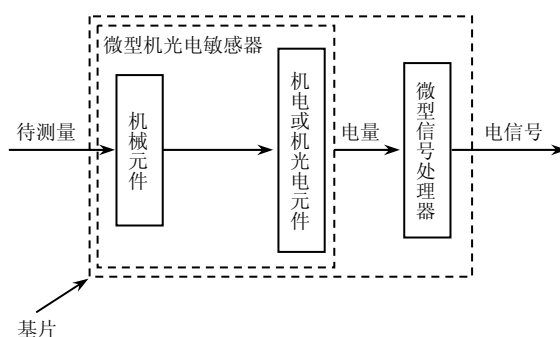


图 3-9 MEMS 传感器技术原理图

MEMS 传感器主要用于控制系统。利用 MEMS 技术工艺将 MEMS 传感器、MEMS 执行器和 MEMS 控制处理器都集中在一个芯片上，所构成的系统称为 MEMS 芯片控制系统，如图 3-10 所示。MEMS 控制处理器的主要功能包括模/数（A/D）和数/模（D/A）转换，数据处理和执行控制算法。MEMS 执行器将电信号转换成非电量，使被控对象产生平动、转动、声、光、热等动作。系统接口单元便于与高层的管理处理器通信，以适合远程分布测控。

MEMS 传感器具有体积小，重量轻，响应速度快，灵敏度高，易批量生产，成本低，以及可测量各种物理量、化学量和生物量等优势，在航天、航空、航海、兵器、机械和化工等领域，尤其是汽车工业获得较广泛应用，且在国外已形成 MEMS 产业。

MEMS 器件目前已有 MEMS 压力传感器、加速度计、陀螺、静电电机、磁力矩器、电池、多路转换开关和矩阵开关等。这里以压力传感器和加速度计为例，作简要介绍。

#### 1. 压力传感器

MEMS 压力传感器的原理是利用被测压力作用于敏感元件引起电阻变化，再通过恒流源或惠斯顿电桥将电阻变化转化成易测量的电压。这种传感器用单晶硅作基片，用

MEMS 技术在基片上生成力敏薄膜，然后在膜上扩散杂质形成 4 个应变电阻，再将应变电阻连接成惠斯顿电桥电路，以获得较高的压力灵敏度，其输出大多为 0~5V 模拟量。一枚晶片可同时制作多个力敏芯片，易于批量生产。力敏芯片性能受温度影响，一般采用调理电路补偿。

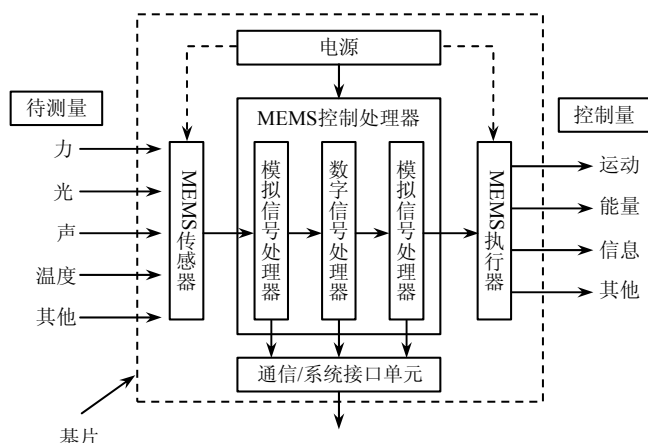


图 3-10 MEMS 芯片控制系统

## 2. 加速度计

MEMS 加速度传感器基于牛顿第二定律  $f=ma$ 。其原理是：敏感元件通常由一个平行的悬臂梁构成，悬臂梁的一端固定在边框架上，另一端固定在一个小质量物体块（约  $10\mu\text{g}$ ）。无加速度  $a$  时，质量块不运动，而当有垂直加速度  $a$  时，运动力  $f$  将导致质量块在悬臂梁活动端有位移。

敏感元件的结构主要有悬臂梁式和梳齿状折叠梁式。前者结构简单，采用各向异性硅材料，用半导体平面工艺，各向异性腐蚀和静电封装制作。后者可看做是悬臂梁的并/串联组合，结构设计复杂，采用各向同性的多晶硅材料，用表面牺牲层技术制作。按位移检测方式不同，MEMS 加速度计有电阻式、电容式、隧道式、共振式和光纤式等。

### 3.3.2 数字传感器技术

数字式传感器具有下列优点：高的测量精度和分辨率，测量范围大；抗干扰能力强，稳定性好；信号易于处理、传送和自动控制；便于动态及多路测量，读数直观；安装方便，维护简单，且工作可靠性高。

感应同步器是典型的数字传感器。感应同步器利用电磁感应原理把位移量转换成数字量，是一种多极感应元件。由于多极结构对误差起补偿作用，所以用感应同步器来测量位移具有精度高、工作可靠、抗干扰能力强、寿命长等优点。感应同步器的输出信号的处理方式主要有鉴相法、鉴幅法和脉冲调宽法三种。

编码器也是一种典型的数字式传感器。编码器以其高精度、高分辨率和高可靠性而被广泛用于各种位移测量。编码器按结构形式有直线式编码器和旋转式编码器之分。旋转式光电编码器是用于角位移测量的最有效和最直接的数字式传感器，已有各种系列产品可供选用。

光栅是一种数字式传感器。光栅由很多等节距的透光缝隙和不透光的刻线均匀相间排列构成的光器件。按工作原理，有物理光栅和计量光栅之分，前者的刻线比后者细密。物理光栅主要利用光的衍射现象，通常用于光谱分析和光波长测定方面。计量光栅主要利用光栅的莫尔条纹现象，被广泛应用于位移的精密测量与控制中。按应用需要，计量光栅又有透射光栅和反射光栅之分，而且根据用途不同，可制成用于测量线位移的长光栅和测量位移的圆光栅。

频率式传感器也属于数字式传感器。频率式传感器的输出虽然也是一系列脉冲，但与被测量对应的是脉冲的频率。频率式传感器的特点是能把被测量转换成与之相对应且便于处理的频率输出。

### 3.3.3 集成传感器技术

集成传感器是利用集成电路工艺（镀膜、掩膜和腐蚀等）将半导体敏感元件及测量处理电路集成在一个芯片上的传感器。集成传感器技术的原理如图 3-11 所示。

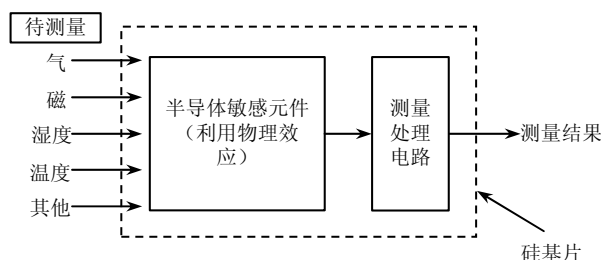


图 3-11 集成传感器技术原理图

半导体敏感元件是基于半导体材料和 P2N 结的物理效应，将被测的非电量转换成电量。例如，热敏、光敏、磁敏和压敏等效应。集成传感器输出归一化的测量信号，由仪器完成采集和处理等操作。若将仪器的采集、处理、控制与显示等电路均集成在同一芯片上，则称为集成仪器芯片。若将多个仪器及系统接口也集成在同一芯片上，则称为集成测量系统芯片。

集成传感器具有体积小、重量轻、精度高的特点，且可做到高可靠、长寿命、低功耗和低成本，是一代新型传感器，目前已广泛用于石油、化工、机械动力、气象、地质、生物医学及航空、航天和航海等领域。下面以集成温度传感器和霍尔效应集成传感器为例简单介绍集成传感器。



### 1. 集成温度传感器

图 3-12 所示为集成温度传感器组成框图。热敏电阻将被测温度转换成电阻，通过模拟测量电路的恒流源或电桥将电阻转换成电压，信号处理电路包括线性化、归一化、影响量补偿，及至转换成数字量处理等功能。

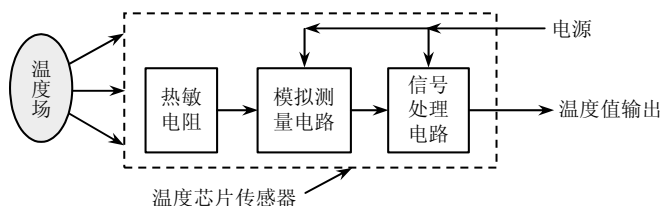


图 3-12 集成温度传感器组成框图

### 2. 霍尔效应集成传感器

霍尔效应是美国物理学家 E.HALL 于 1879 年发现的一种新的物理效应。在一片金属薄片的上下方（垂直方向）通电流  $I$ ，在垂直于金属面的方向（深度方向）加磁场（磁感应强度为  $B$ ），则在金属片的左右两侧（水平方向），产生电压  $V_H$ ，这一效应称为霍尔效应。实验证明，只要磁场不特别强， $V_H$  和  $I$  和  $B$  成正比，与薄片厚度成反比，即

$$V_H = R_H \frac{I \cdot B}{d} \quad (3.15)$$

式中， $V_H$  为霍尔电压， $R_H$  为霍尔系数，金属片称为霍尔元件。

对给定的霍尔元件， $R_H$  和  $d$  是已确定的，所以上式可以改写为

$$V_H = \frac{R_H}{d} I \cdot B = K_H \cdot I \cdot B \quad (3.16)$$

式中， $K_H$  称为霍尔灵敏度。

霍尔电压  $V_H$  通常很小，需要放大。将霍尔元件、放大器、温度补偿电路和稳压电源等集成在一个芯片上称为霍尔集成传感器。根据传感器输出信号的形式，可以将霍尔集成传感器分为“线性型”和“开关型”两种。通常电冰箱门就是利用开关型霍尔集成传感器进行检测报警的。开关型霍尔集成传感器还可用于照明、供水等自动控制设备中，线性型霍尔传感器则可用于微弱磁场的测量。

### 3.3.4 多功能传感器技术

从测量功能角度来看，传统传感器一般是将一个被测非电量转换成一个电量。从系统角度看则是单输入单输出系统（不含用于补偿的影响量输入）。而多功能传感器是将多个（两个以上）被测量转换成一个电信号。从数学角度，它能实现多元函数功能。多功能传感器技术原理如图 3-13 所示。

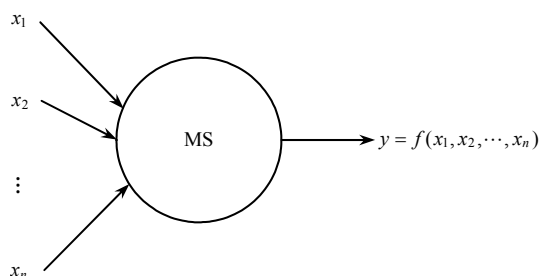


图 3-13 多功能传感器技术原理图

多功能传感器不能单个应用，必须组成阵列，且被测量个数应等于传感器个数，因为这种配置是精度和成本平衡的最佳选择。如图 3-14 所示，其中每个传感器的输出  $y_i$  都是  $n$  个被测量  $x$  组合作用的结果。信号重构部件经有限样本训练后，通过某些算法可由输入量  $y$  重构被测量的最佳值  $x'$ 。

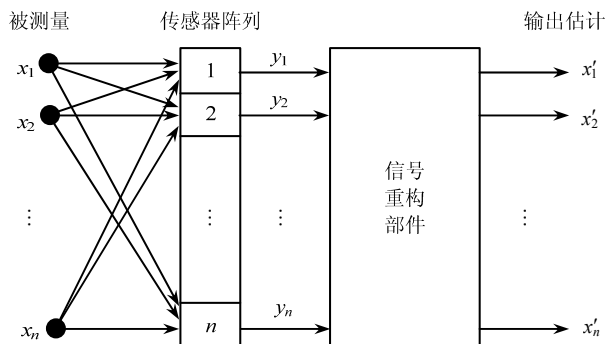


图 3-14 多功能传感器结构模型

图中的传感器阵列是结构已知的无记忆时不变的多输入/输出系统，输入和输出映射关系为

$$\mathbf{Y} = f(\mathbf{X}) \quad (3.17)$$

式中， $\mathbf{X}$  是输入矢量， $\mathbf{Y}$  是输出矢量， $f(\bullet)$  是向量映射函数。问题是已知映射函数  $f(\bullet)$  和观测矢量  $\mathbf{Y}$ 。

如何构造一个逆系统来重构任意的被测矢量  $\mathbf{X}$ 。这一问题一般称为信号重构恢复或分离，在数学上称为函数反演问题。逆系统可由下式来描述

$$\mathbf{Y} = f^{-1}(\mathbf{X}) \quad (3.18)$$

式中， $f^{-1}(\bullet)$  表示  $f(\bullet)$  的反函数。在实际遇到的很多问题中，向量值函数  $f(\bullet)$  非常复杂，很难甚至不可能用数学方法直接求出反函数  $f^{-1}(\bullet)$  的解析式。一般在给定样本集  $\{(\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i)\}_{i=1}^n$ ，用构造近似的网络或算法模型来逼近函数  $f^{-1}(\bullet)$ 。图 3-15 所示为基于神经网络模型的逆系统框图。

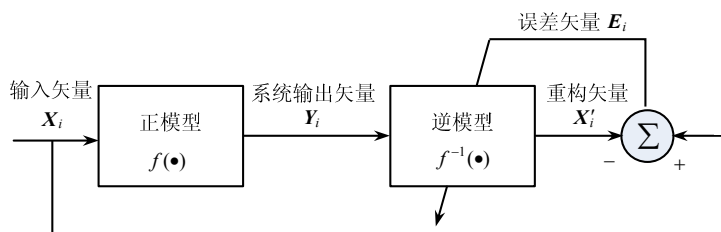


图 3-15 基于神经网络模型的逆系统框图

在这种描述情况下， $X_i$  和  $Y_i$  交换了位置，即矢量  $Y_i$  为输入，矢量  $X'_i$  为输出， $X_i$  为期望的响应。假定矢量  $E_i$  表示  $X'_i$  与  $X_i$  的误差。利用误差向量信号调节网络的自由参数（权值和阈值），最终使误差信号  $E_i$  的平方差、均方差、标准差或信息熵在整个训练样本集上达到统计意义上的最小，从而完成网络参数的最优估计。之后在测试时，输入整个测试范围内的任何矢量值  $X_i$ ，多功能传感器都能给出满足一定精度的最佳估计值  $X'_i$ 。这种神经网络模型构建的关键是假设或选择网络模型、参数估计公式和样本训练的三位一体三个方面。

#### 1) 假设或选择网络模型

网络模型的选择依赖于实际对象映射函数  $f(\bullet)$  的复杂性。网络模型很多，如单层感知器和多层感知器等，通常选择 BP 网络和 RBP 网络用于函数逼近。模型选择的有效性采用交叉确认方法判断，即将训练集分成两个子集，一个子集用于估计网络参数，另一个子集测试确认情况。

#### 2) 参数估计公式

根据选择的网络模型，利用数学工具优化推导，得出参数估计的递归迭代公式。

#### 3) 样本训练

利用选定的样本集，通过参数估计公式反复训练参数，直至获得满足要求的最佳参数数值为止。样本集大小  $N$  依赖于网络参数（权值和阈值）的总和。

由于计算机技术和数值计算方法的飞速发展，单输入/输出系统、多输入/输出系统的信号重构方法在诸多科学与工程领域已获得广泛应用。例如，多雷达系统盲信号分离，多传感器系统信号重构等。目前三元溶液（水、食糖、食盐）浓度测量传感器和测量应变、温度的锥形光纤光栅传感器这样的多功能传感器均已成功应用，可实现对多种信息的同时测量。

### 3.3.5 模糊传感器技术

模糊传感器是基于模糊集理论和技术，将输入的模拟或数字被测量（即传统传感器的输出量）转换成模糊量的传感器。模糊集合论认为某元素既属于集合  $A$  又属于集合  $B$ ，

由隶属函数值判断最终所属的集合，而经典集合论认为某元素属于集合  $A$  就不属于集合  $B$ ，反之亦然。

模糊传感器的原理是将被测量范围划分成若干区间，利用隶属度判断被测量所处的区间，并用区间中值或相应的特定符号表示被测量，这一过程称为模糊化。实现模糊化过程的变换器称为模糊器，或符号变换器。显然，模糊区间越小精度越高，但测量速度越慢。隶属函数的选取也影响模糊传感器的精度和速度，一般常选用三角函数或高斯函数等。图 3-16 所示为模糊传感器技术原理图。图中范围划分器提供区间端点值；模糊器计算各区间的隶属函数值，判断被测量值所属的区间，并输出表示被测量值的区间中值或相应的区间符号；组合模糊判决器将多个被测量符号进行组合判决，并依模糊判据给出最终测量结果。

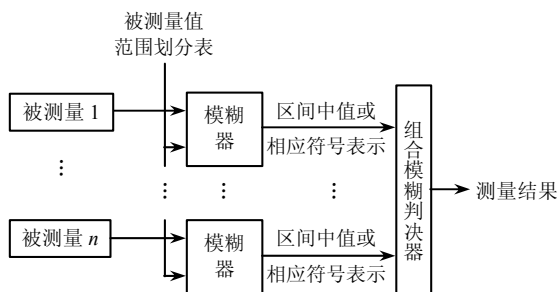


图 3-16 模糊传感器技术原理图

模糊传感器广泛应用于模糊控制和多因素综合结果评价等场合，具有速度快，设备简单、成本低和可靠性高等优点。图 3-17 所示为基于温度、湿度的环境舒适度模糊传感器原理框图。它将传统传感器输出的温度和湿度值分别输入到相应的模糊器。温度和湿度模糊器分别将温度和湿度分成 5 个区间，选择的隶属函数  $\mu = e^{-K(t-a)^2/2}$ ，组合模糊判决器按判据给出测量结果。

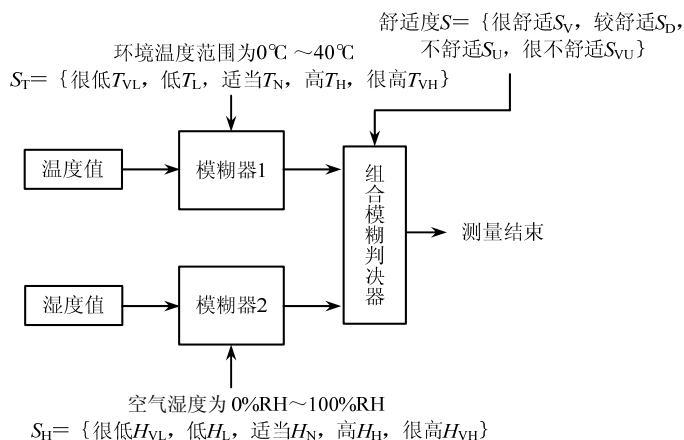


图 3-17 基于温度、湿度的环境舒适度模糊传感器原理框图

由表 3-1 可见,舒适度有 4 种结果:很舒适  $S_V$ 、较舒适  $S_D$ 、不舒适  $S_U$ 、很不舒适  $S_{VU}$ 。温度很低  $T_{VL}$  或很高  $T_{VH}$ ,湿度很低  $H_{VL}$  或很高  $H_{VH}$  的任何组合都是很不舒适的,只有温度适当和湿度适当时才是很舒适的环境。当然,描述人们生存环境的舒适度还受噪声、电磁干扰、辐射、大气污染等多种因素影响,利用模糊传感器进行测量和控制是最佳的选择。

表 3-1 舒适度组合模糊判据

温 度	湿 度				
	很低 $H_{VL}$	低 $H_L$	适当 $H_N$	高 $H_H$	很高 $H_{VH}$
很低 $T_{VL}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$
低 $T_L$	很不舒适 $S_{VU}$	不舒适 $S_U$	较舒适 $S_D$	不舒适 $S_U$	很不舒适 $S_{VU}$
适当 $T_N$	很不舒适 $S_{VU}$	较舒适 $S_D$	很舒适 $S_V$	较舒适 $S_D$	很不舒适 $S_{VU}$
高 $T_H$	很不舒适 $S_{VU}$	不舒适 $S_U$	较舒适 $S_D$	不舒适 $S_U$	很不舒适 $S_{VU}$
很高 $T_{VH}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$

### 3.3.6 网络传感器技术

网络传感器(或执行器)是配备网络接口的传感器。网络接口用微处理器实现,也称为智能网络传感器。这种传感器应符合 IEEE 1451 标准,因此也称为 IEEE 1451 传感器。这种传感器可作为局域网(LAN)、城域网(MAN)、广域网(WAN)以及 Internet 的终端,可通过网络接口访问网络节点计算机、其他仪器和传感器等终端设备,交换和共享数据。这种传感器特别适合远程分布测量、监视、控制和维修等应用。传感器厂家不需要构造支持特定网络协议的多种定制接口,且传感器接口与网络接口之间也采用标准的有线或无线连接方法。由于厂家生产的传感器接口模块及其网络接口模块都是符合标准的配套件,因此传感器系统和网络都能实现即插即用。

网络传感器功能模块如图 3-18 所示。传感器的网络接口处理器模块 NCAP 的主要功能是实现传感器与网络通信,混合模式接口(MMI)通信和数据转换功能。网络的中央处理器单元 CPU 利用通用指令集和智能换能器目标模型通过 NCAP 访问换能器接口模块。换能器接口模块(TIM)是混合模式接口与传感器特定接口之间的实际连接部件,包括最多达 255 个信号调理、模拟数字信号转换(A/D、D/A)、换能器电子数据表和选址逻辑部分。换能器电子数据表 TEDS 包含换能器特性数据、ID 号和厂家等信息。TEDS 有很多类型,如原始的、标准的和修正的等。

网络传感器的接口和配置如图 3-19 所示。由图可见,换能器的网络接口可以是网络应用处理器、带网口的仪器或带网口的无线访问设备。网络接口模块与换能器接口模块之间的通信可以采用标准的离散线,串、并行总线,微型 LAN 接口,混合模式接口,WiFi、Blue Tooth 和 ZigBee 等无线接口。换能器接口模块最多可接 255 个换能器终端。

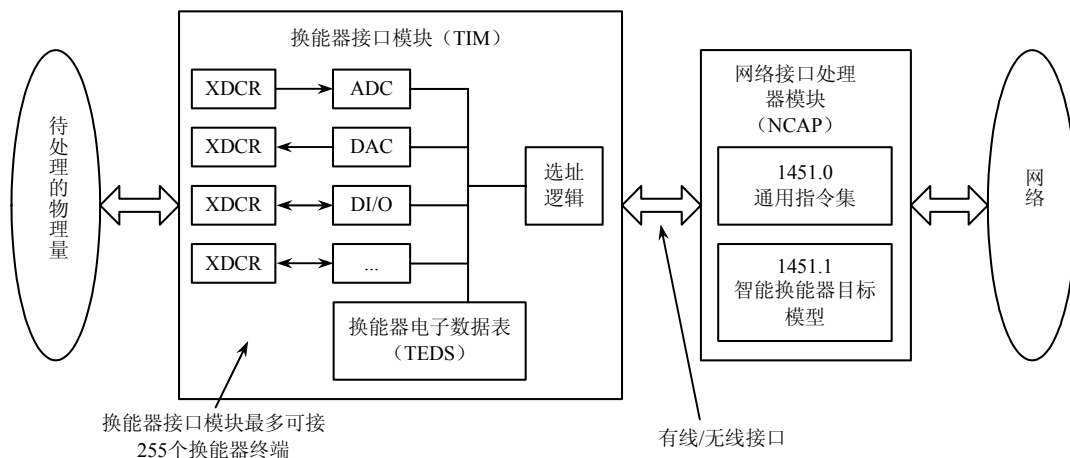


图 3-18 网络传感器功能模块

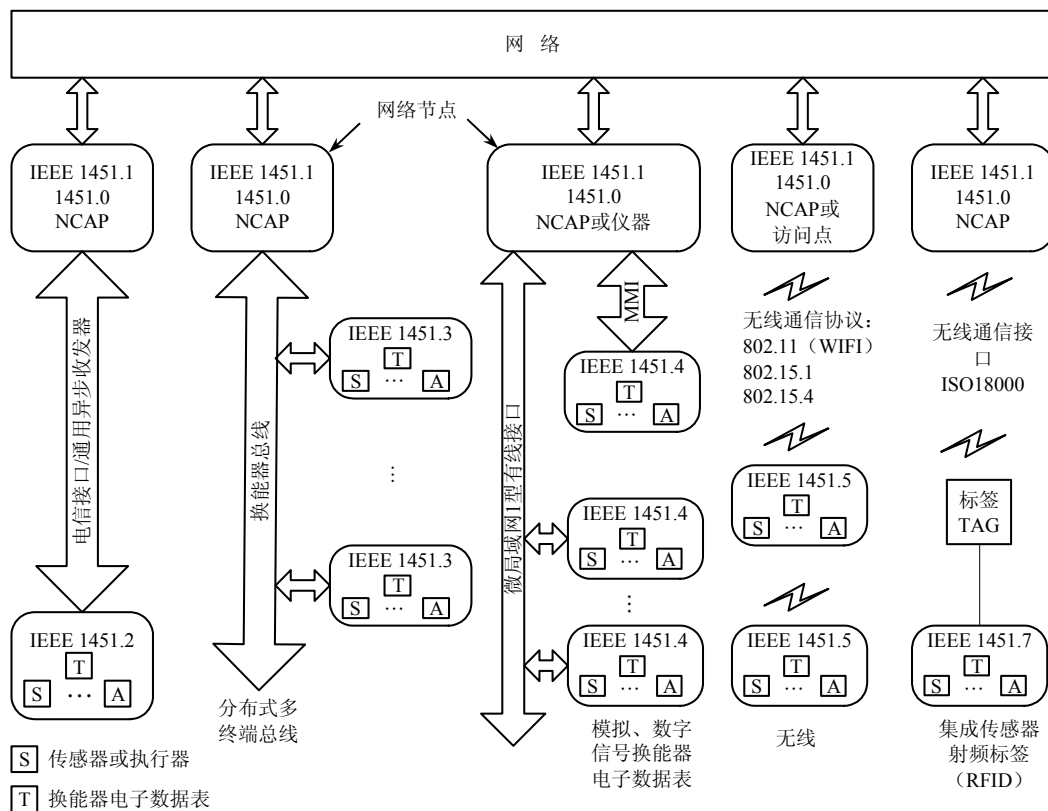


图 3-19 网络传感器的接口和配置

图 3-20 给出了网络传感器通过网络接口组成的 IEEE 1451 标准网络传感器应用模型。该网络有三个智能网络换能器系统，分别完成分布控制、远程检测和远程执行任务。每个系统可连接的换能器终端最多 255 个。

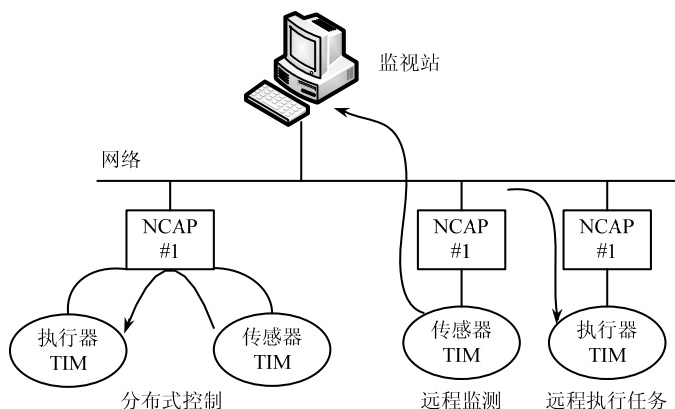


图 3-20 IEEE 1451 标准网络传感器应用模型

网络传感器目前在监控机床状态、舰艇运行状况、港口集装箱状态、油路管线健康状况等方面已有应用。例如，在机床状态监控中，每台机床配备一个智能网络传感器盒，盒中包括网络接口处理器和传感器接口模块，连接的传感器可以检测加工工件、刀具的机械参数和机床的电气参数。在舰艇运行状况监视中，构建分布式传感器网，艘舰之间都通过无线访问终端进行通信，其中一艘舰（航母）与岸基监控维修站通信。舰上的全部换能器组成有线换能器系统，岸基站通过 Internet 与厂家等有关部门组成传感器网络，同时该网还可用于编队的导弹、卫星和车辆监测等。在火灾及消防员态势监视和指挥中，建筑物内配备的有线和无线烟雾、温度等传感器，通过无线 Ad hoc 网可以实时传递传感器信息，车载移动指挥站的指挥员与手持无线对讲机的消防员也可以随时进行通信。

### 3.3.7 模型传感器技术

模型传感器是用模型描述实际传感器特性和过程的传感器，定义为能建立模型的传感器。模型是实际事物和过程（简称对象）的等效表示形式，可以是实物模型（如电路）、数学模型、网络模型、数据模型或程序模型等。传感器数学模型便于利用数学手段分析传感器性能和系统建模，为优化设计提供基础。例如，利用求导和微分可分析其灵敏度、稳定性，并寻求最佳结构参数值等。传感器网络模型便于模拟实验分析设计传感器及其组成的系统性能特性。传感器程序模型便于使用计算机分析、仿真设计传感器和系统。传感器数据模型用于上述模型的验证和参数估计。利用逆模型可补偿实际传感器性能不理想和外界环境引起的信号失真，补偿的最终目的是提高传感器的精度和扩展传感器的动态范围和频响范围等。

如果已知传感器结构和参数，利用系统分析理论和数学方法可直接导出描述传感器输入/输出特性的精确函数公式。但由于被建模的实际传感器是复杂的系统，很难甚至不可能精确地建立数学模型，因此通常采用近似模型来逼近实际特性。神经网络可逼近实

际传感器的输入/输出映射函数, 假设实际传感器是多输入/输出的非线性未知系统, 则可用图 3-21 所示的神经网络模型进行系统辨识。假定  $X_i$  是输入矢量,  $D_i$  是未知系统的输出矢量,  $Y_i$  是神经网络的输出矢量,  $E_i$  是误差矢量。利用实际传感器测试的样本集合  $\{(X_i, D_i)\}_{i=1}^N$  训练神经网络, 并用这个误差信号来调节神经网络的自由参数(权值和阈值), 最终使误差信号在整个样本集上的平方差在统计意义上达到最小, 从而得到实际对象的神经网络模型。

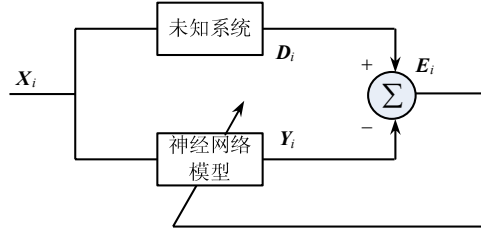


图 3-21 神经网络模型的系统辨识原理图

根据实际对象先验知识, 可以假设一个  $N$  阶多项式作为系统的逼近模型。利用最小二乘法可确定模型阶数和参数, 通过实验设备和方法可获得传感器特性数据模型。而利用编程语言、函数、过程、对象和组件等基本软件实体以及分支、循环调用、代理和中间件等方法可设计程序系统模型。

近年来, 传感器建模理论和技术不断发展, 且在诸多科学和工程领域得到广泛应用。下面以基于 RBF 神经网络的湿度传感器建模方法为例, 详细说明模型传感器技术。

尽管根据不同温度下的传感器输出与实际相对湿度关系可以用温度补偿公式将大部分误差补偿, 但在实际应用中的高温高湿环境下, 补偿公式已不起作用。而 RBF 神经网络的逼近能力和学习速度等各方面均优于 BP 网络, 所以可以基于 RBF 神经网络进行湿度传感器建模。RBF 神经网络模型如图 3-22 所示。RBF 神经网络由输入层、隐层、输出层组成。输入层的两个输入信号为  $V_h$  和  $V_t$ , 输出层的输出信号是湿度  $Y_h$ 。输入层节点函数是斜率为 1 的线性函数, 输出层节点是线性组合器, 可调节的参数就是该线性组合器的权值  $W_i$ , 而隐层节点函数采用高斯函数, 第  $i$  个隐层节点的输出  $V_i$  为

$$V_i = \exp \left[ \frac{(X - C_i)^T (X - C_i)}{\partial \sigma_i^2} \right] \quad (3.19)$$

式中,  $X = (V_h, V_t)^T$  为输入样本;  $C_i$  为高斯函数中心值;  $\sigma_i$  为标准偏差,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  为隐层节点数。那么, 输出层输出为

$$Y_h = \sum_{i=1}^n W_i V_i - \theta \quad (3.20)$$

式中,  $\theta$  为输出层神经元的阈值。由上式可知, RBF 神经网络在结构上具有输出权值线



性关系, 故 RBF 神经网络的训练方法快速易行。

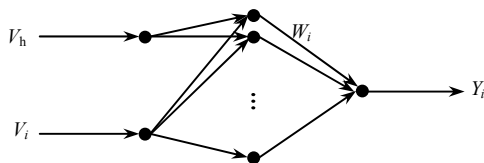


图 3-22 RBF 神经网络模型

### 3.3.8 智能传感器技术

智能传感器概念最早由美国宇航局在研发宇宙飞船过程中提出来, 并于 1979 年形成初步产品。宇宙飞船上需要大量的传感器不断向地面或飞船上的处理器发送温度、位置、速度和姿态等数据信息, 即便使用一台大型计算机也很难同时处理如此庞大的数据。何况飞船又限制计算机体积和重量, 于是美国宇航局引入了分布处理的智能传感器概念。智能传感器的核心思想是赋予传感器智能处理功能, 以分担中央处理器集中处理功能。同时, 为了减少智能处理器数量, 通常不是一个传感器而是多个传感器系统配备一个处理器, 且该系统处理器配备网络接口。

智能传感器发展至今, 尚没有标准化的科学定义。归纳诸多学者的观点, 本书认为应模仿人的感官和大脑功能来定义智能传感器。本质上, 它应定义为: 基于人工智能理论, 利用微处理器实现智能处理功能的传感器。智能传感器不仅具有视觉、触觉、听觉、嗅觉和味觉功能, 且应具有记忆、学习、思维、推理和判断等“大脑”能力。前者由传统的传感器来完成。此处的传统传感器的功能结构包括敏感元件、调理电路和模/数转换器 (ADC), 敏感元件将描述客观对象与环境状态, 或特性的物理量转换成电路元件的参量或状态参量, 调理电路将电路参量转换成电压信号并进行归一化处理以满足 ADC 的动态范围。智能处理器应对 ADC 输出的数字信号进行智能处理, 其主要包括如下五种智能处理功能。

#### 1) 自补偿功能

根据给定的传统传感器和环境条件的先验知识, 智能处理器利用数字计算方法, 自动补偿传统传感器硬件线性、非线性和漂移以及环境影响因素引起的信号失真, 以恢复被测信号。它的计算方法用软件实现, 可达到软件补偿硬件缺陷的目的。

#### 2) 自计算和处理功能

根据给定的间接测量和组合测量数学模型, 智能处理器利用补偿的数据可计算出不能直接测量的物理量数值。通过给定的统计模型计算被测对象总体的统计特性和参数, 以及利用已知的电子数据表, 使处理器可重新标定传感器特性。

### 3) 自学习与自适应功能

智能传感器通过对被测量样本值学习, 可以利用近似公式和迭代算法, 认知新的被测量值, 即有再学习能力。同时, 通过对被测量和影响量的学习, 智能处理器还可利用判断准则自适应地重构结构和重置参数。例如, 可以实现自选量程、自选通道、自动触发、自动滤波切换和自动温度补偿等。

### 4) 自诊断功能

由于内部和外部因素的影响, 使得智能传感器的性能会下降或失效, 这分别称为软、硬故障。智能处理器可以利用补偿后的状态数据, 通过电子故障字典或有关算法预测、检测和定位故障。

### 5) 其他常用功能

其他常用功能包括用于数据交换的通信接口功能, 数字和模拟的输出功能, 以及使用备用电源的断电保护功能等。

根据上述功能分析, 智能传感器技术原理如图 3-23 所示, 其中没有标出影响量的传感器功能模块。

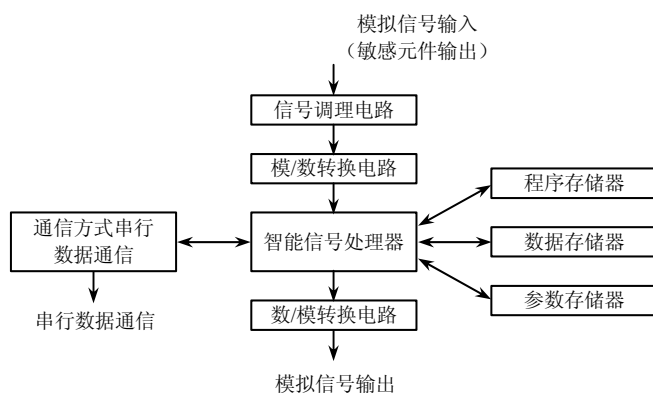


图 3-23 智能传感器技术原理图

智能传感器的实现方式有模块化集成、单芯片集成和多芯片集成三种方式。

#### 1) 模块化集成

模块化集成是指将敏感元件、调理电路和微处理器都做成带标准接口的模块, 将模块集成并配备有关的智能处理软件。这种方式最经济且快速。

#### 2) 单芯片集成

单芯片集成是利用微电子机械加工技术将智能传感器的硬件集成在一个芯片上。这种方式使智能传感器达到微型化、结构一体化, 从而提高了精度、稳定性和可靠性。若敏感元件构成阵列并配备相应的图像处理软件, 可成为二维和三维图形图像传感器, 从而达到它的最高级形式。

### 3) 多芯片集成

多芯片集成是根据需要和可能,将系统的各功能部件或模块(如敏感、调理、处理和接口)分别集成在两个或多个芯片上,并将芯片以不同方式组合在一个基片上,封装在一个外壳里。多芯片集成适合更复杂系统的集成,它对给定的系统可降低集成工艺的设备要求。

智能传感器目前已广泛应用于航天、航空、国防、科技和工农业生产等各个领域,如在机器人领域,这种智能传感器使机器人具有类人的五官和大脑功能,可感知各种现象,完成各种动作。在工业生产中,传统的传感器可能无法对某些产品质量指标(如黏度、硬度、表面光洁度、成分、颜色及味道等)进行快速直接测量并在线控制。而利用智能传感器可直接测量与产品质量指标有函数关系的生产过程中的某些量(如温度、压力、流量等),使用神经网络或专家系统技术建立的数学模型进行计算,推断出产品的质量。在医学领域中,糖尿病患者测血糖时必须刺破手指采血,再将血样放到葡萄糖试纸上,最后把试纸放到电子血糖计上进行测量。这是一种既麻烦又痛苦的方法。美国 Cygnus 公司生产了一种“葡萄糖手表”,其外观像普通手表一样,戴上它就能实现无疼、无血、连续的血糖测试。“葡萄糖手表”上有一块涂着试剂的垫子,当垫子与皮肤接触时,葡萄糖分子就被吸附到垫子上,并与试剂发生电化学反应,产生电流。经传感器测量该电流,并通过处理器计算,得出与该电流对应的血糖浓度,并以数字量显示。

智能温度传感器功能结构框图如图 3-24 所示,它具有自动通道选择、自动量程选择、自动补偿和自动报警等多种智能功能。

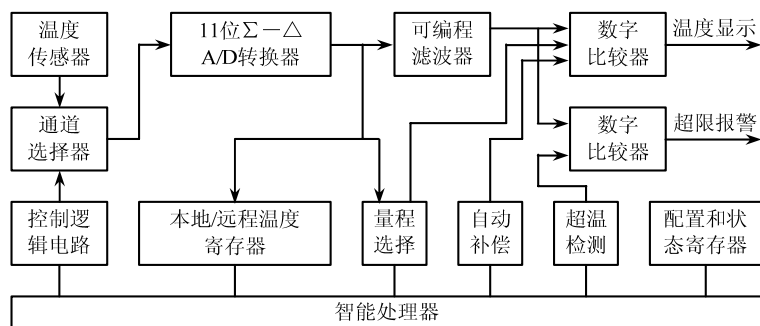


图 3-24 智能温度传感器功能结构框图

虚拟化、网络化智能传感器和多传感器信息融合技术是智能传感器发展完善的三个主要方向。虚拟化是通过通用的硬件平台充分利用软件实现智能传感器的特定硬件功能,虚拟化传感器可缩短产品开发周期,降低成本,提高可靠性。网络化智能传感器是将各种总线的多个传感器组成系统并配备带有网络接口(LAN 或 Internet)的微处理器。通过系统和网络处理器实现传感器之间、传感器与执行器之间、传感器与系统之间的数据交

换和共享。多传感器信息融合是指智能处理的多传感器信息经元素级、特征级和决策级组合,形成更为精确的被测对象特性和参数。

### 3.3.9 图像传感器技术

图像传感器是用来完成图像信息光电变化的功能器件。图像传感器的主流技术有电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)和互补金属氧化物场效应管(Complementary Metal-Oxide Semiconductor, CMOS)两大类。

CMOS 和 CCD 一样都是可用来感受光线变化的半导体,对于 CCD 图像传感器而言,目前应用已经比较广泛,但由于工艺上的原因,导致敏感元件和信号处理电路不能集成在同一芯片上,所以由 CCD 图像传感器组装的摄像机体积大、功耗大。CMOS 在处理器、闪存和专用半导体集成电路技术上占有绝对重要的优势地位。CMOS 图像传感器在问世以来,一直存在着光照灵敏度低和图像分辨率低的缺点,其图像质量无法与 CCD 图像传感器相比,然而随着微电子技术的发展,现在 CMOS 图像传感器的光照灵敏度已接近 CCD 图像传感器,如果噪声进一步降低,CMOS 图像传感器的图像质量可以达到或超过 CCD 图像传感器的水平,同时它能够实现体积小、重量轻、功耗低、集成度高和价位低等 CCD 图像传感器无法比拟的优点。

确切地说,CMOS 图像传感器是一个图像系统,如图 3-25 所示。设计高集成度单芯片 CMOS 图像传感器的目标是:力求使图像传感器的应用更容易实现多功能,包括自动增益控制(AGC)、自动曝光控制(AEC)、自动白平衡(AWB)、伽玛校正、自动对焦、亮度和色度的自动控制,并可以加入客户某种特殊用途的算法 IP 块,所有的矩阵处理功能都集成在芯片中。与传统 CCD 图像系统相比,把整个图像系统集成在一块芯片上不仅降低了功耗,而且具有重量轻、占用空间少以及总体价格更低等优点。

CMOS 相对 CCD 最主要的优势就是非常省电,与由二极管组成的 CCD 不同,CMOS 电路几乎没有静态电量消耗,只有在电路接通时才有电量消耗,这就使得 CMOS 的耗电量只有普通 CCD 的 1/3 左右,而 CMOS 主要问题是在处理快速变化的影像时,由于电流变化过于频繁而使得传感器过热,如果暗电流抑制的不好就十分容易出现杂点。

但是随着大规模集成电路的发展,改进了图像传感器芯片的设计,尤其是改进了亚微米和深亚微米级设计,使得 CMOS 图像传感器在暗电流、噪声、填充因子和动态范围的不足大为改善,加之 CMOS 图像传感器本身固有的优良特性,使得 CMOS 图像传感器吸引了越来越多的注意力,已有逐步取代 CCD 图像传感器成为主流的趋势。近年来,CMOS 图像传感器的年销售额一直保持高速增长,并以其低成本、低功耗、易集成和读取灵活等优点被广泛用于工业、航天、空间技术、医疗、军事、交通监控、汽车电子、指纹识别、机器人视觉、水下探测、消费类产品和安防监控等领域。表 3-2 为 CMOS 图像传感器与 CCD 图像传感器的对比。

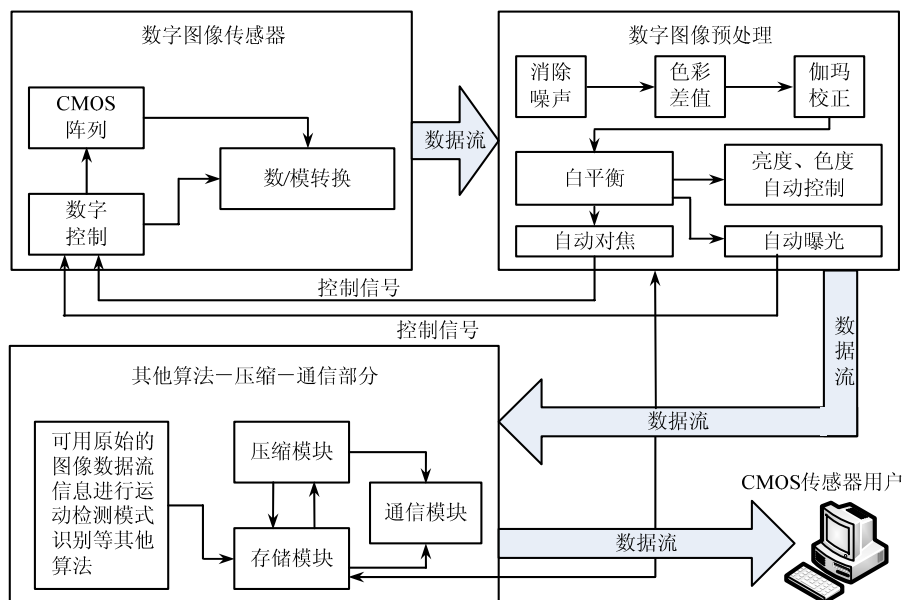


图 3-25 CMOS 图像传感器系统

表 3-2 CMOS 图像传感器与 CCD 图像传感器的对比

比较特性	CCD 图像传感器	CMOS 图像传感器
生产线	专用	通用
价格	昂贵	便宜
集成度	低，需要外接芯片单片	集成度高
系统功耗	高	低
电源	多电源	单一电源
抗辐射	弱	强
电路结构	复杂	简单
灵敏度	优	良
信噪比	优	良
图像	顺序读出	同时读出
动态范围	70dB	70dB
芯片面积	大	小

由于 CMOS 图像传感器具有其体积小、低功耗、低成本、集成度高等优点，符合当今便携、节能环保的“绿色 IC”要求，目前国际上已有多家科研单位和小组致力于 CMOS 图像传感器的技术研发，包括美国斯坦福大学、加拿大滑铁卢大学、贝尔实验室、美光科技有限公司、豪威科技有限公司和佳能公司等；但是中国国内开展 CMOS 图像传感器的研发单位很少，目前主要有复旦大学、中科院微电子所和北京思比科微电子有限公司等。

CMOS 图像传感器的像素规模由最初的几万像素发展到现在的千万像素，生产工艺也由原来微米级减小到现在纳米级，其图像质量越来越好，动态范围越来越大，芯片尺

寸越来越小。

目前 CMOS 图像传感器主要有三种发展趋势:

(1) 独立传感器芯片, 用于提供原始图像数据。

(2) 集图像传感器+图像处理器的 SoC (System on Chip), 用于提供画质较好、符合特殊应用的图像数据。在消费类电子产品当中所使用的 CMOS 图像传感器, 已有近 90% 和图像处理器集成在一起构成 SoC 芯片。随着越来越多 CMOS 图像传感器制造商开拓监控类产品市场, 将 CMOS 图像传感器与图像处理器集成在一起的监控 CMOS 图像传感器 SoC 也将成为发展方向之一。

(3) 集图像传感器+图像处理器+图像压缩器为一体, 图像数据可通过网络接口、无线射频接口传输, 使系统高度集成, 进一步减小功耗、降低成本, 便于应用。

### 3.4 军用传感器技术

对于军事目标而言, 无论是动态的还是静态的, 无论采用何种手段加以伪装或保护, 只要它存在, 就决定了它必然具备可以探测的物理因素, 如目标的形状、颜色、速度和振动, 目标本身反射或发出的无线电波、红外线、雷达波和音响噪声等。这些被称为目标信息的物理因素构成了目标的可探测性和可攻击性。传感器是探测与获取这些物理因素的重要手段。军用传感器主要作用之一, 就是根据这些目标信息, 对目标进行精确定位, 引导武器系统的战斗部分将其摧毁。实践证明海湾战争中使用的新技术武器上装备的传感器, 在对敌侦察、目标探测和自我防护中发挥了重要作用。

#### 3.4.1 军用传感器的作用和要求

传感器已在很多种高技术武器和军用装备中得到广泛的应用, 图 3-26 所示为军用传感器技术的应用需求。

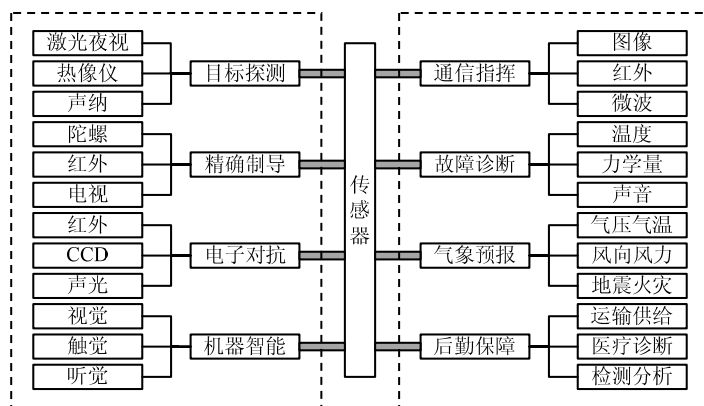


图 3-26 军用传感器的应用需求

高技术武器发展的主要特征是电子信息化,其核心技术是传感器技术和计算机技术。在战场上,一方面靠外部传感器快速发现与精确测定敌方目标,并通过计算机控制火控系统,快速精确地打击敌方目标;另一方面,靠各种内部传感器,测定火控系统、发动机系统等各部位各类参数,通过计算机控制,用以保障武器本身处于最佳状态,发挥最大效能。传感器在实战中的作用,可以归纳如下。

#### 1) 看得见靠传感器

采用各类先进红外探测系统(红外夜视仪、微光夜视仪和热成像仪等),增大了武器装备探测敌方目标的距离。例如,现代主战坦克的视距可达 2000~3000m,其目标图像的分辨率高,在 2000m 视距内能分辨出 2m 长的车辆,在 1000m 视距内能分辨出人的形象。

E-3A 预警机对低空目标的探测距离达 180km,可以同时探测、跟踪 600 批目标,引导截击 100 批目标。KH-11、KH-12 等照相侦察卫星装有电视摄像机、传感器,分辨率可达 3~10cm。

#### 2) 打得准靠传感器

现代坦克用的火控系统配有多种类型的传感器,使火控系统可自动瞄准目标,有效地提高了火炮的射击精度。例如,静止目标的首发命中率已由原来的 50%提高到 80%~90%;且从发现目标到发射炮弹的反应时间由 15s 以上缩短到 5~9s,行进间对运动目标的首发命中率可达 65%~80%。

红外制导、电视制导、光纤制导和光电符合制导极大地提高了炸弹、炮弹的制导精度,如在海湾战争中,“爱国者”导弹系统能同时跟踪 100 个目标,确保精度跟踪 8 个目标,并同时拦截 3 个目标,命中率达 90%以上。“战斧”导弹采用红外成像技术,导弹命中精度可达 10m 左右,比惯导导弹命中率精度提高了 100 倍,击中目标的命中率为 90%。

#### 3) 全天候作战靠传感器

红外探测系统保证了坦克能在夜间能见度很低的条件下或有烟雾、尘埃、雨雪的环境中正常工作,实现了坦克适应全天候作战的要求。

美国 F-15F/A-18 战斗轰炸机能在夜间分清 500m 之外的目标、几千米外的山峦村庄。因此,一向最怕夜战的美军由于各军兵种都装备有以红外传感器为核心的各类夜视装置,在海湾战争中得以实施全天候作战。

#### 4) 故障诊断靠传感器

坦克中的监控系统,配有压力、温度和转移等多种传感器,可以监测发动机、火控等系统各部位的压力、流量、温度、转速、角位移和扭矩等参数,通过计算机能进行故障的自动报警与实时定位显示,以便及时检修,维护坦克的正常工作。

传感器技术与计算机技术已在高技术武器和军用装备中共同起到“军力倍增器”的作用,而且随着现代电子战的需求和发展,传感器技术在研制新一代高技术武器和军用

装备中发挥着越来越重要作用。世界军事技术的发展趋势表明, 21 世纪的战争是信息化的战争, 是以电子信息技术为核心的高技术战争。为适应这一趋势, 发展新一代的军事技术装备就成为各国军事技术竞争的焦点。因此, 作为军事技术装备获取信息的第一道门坎的传感器, 其效能与质量已成为技术装备发展的关键。军用传感器与民用传感器(工业传感器)相比, 由于针对场合不同, 有其自身的特殊性与专用性, 主要体现在品种的特殊性、规格的特殊性(含结构的特殊性)以及特别高的质量要求, 而且随着新一代军事技术装备的发展, 对传感器技术提出了新的需求, 技术要求也越来越高。

### 1. 提高军用传感器的质量

(1) 小型化: 军用传感器由于受到安装空间类型、尺寸与静载荷重量的分配指标限制, 必须进一步缩小体积和减轻重量。航天传感器的单台平均重量应小于 100g, 载人飞行器设置在人体上的传感器(如开伞冲击、风速条件下的翻滚等)和用于小型火箭头部参数测量(如姿态角、过载和冲击等)的传感器重量应为几克到几十克。

(2) 低功耗: 军事技术装备上供电品种单一, 其容量要求很严, 向传感器供电定额分配、单位限量在几百毫瓦级; 而用于长时间飞行的航天传感器的功耗只允许几毫瓦到几十毫瓦。

(3) 高精度: 用于多目标识别与精确定位以及对各种武器的精确控制和制导的传感器均要求高精度, 平均基本误差(常态)为 0.1%~0.5%, 高精度在 0.01%~0.05%。

(4) 快速响应: 用于火箭、导弹、高炮、火和鱼雷等发射与监测的动态传感器要求具有优异的响应、时间常数以及上升时间等参数指标。

(5) 耐恶劣环境: 传感器能适应地面、航空、航天和水下等使用场合的各类环境条件, 其中包括对盐雾、海水、酸碱和霉菌等的耐腐蚀能力以及耐高、低温冲击能力; 振动、加速度传感器能承受很高的过载能力(几千克到几万克); 航天传感器要适应宇宙空间辐射; 用于核爆监测的传感器必须具备距离核爆中心 5km 处的抗核辐射能力。

(6) 长寿命: 军用传感器的存储寿命应为 8~10 年, 使用寿命(一次性使用的除外)应优于 10 年。

(7) 高可靠性: 军用传感器要求承担定量分配的可靠性指标, 尤其是用于发控指令、安全保护类型的航天传感器可靠性更加至关重要, 以确保系统的“稳妥可靠、万无一失”。一般火箭的传感器可靠率要提高到 99.98%。用于载人飞行器的环境控制与生命保障系统、故障检测与诊断系统中的传感器可靠率要求优于 99.8%。各类卫星对传感器使用失效的要求是: 短期(在轨运行一个月的卫星)失效率为  $1 \times 10^{-7}$ /元件·h; 中期(在轨运行装卸至 1 年的卫星)失效率为  $1 \sim 5 \times 10^{-8}$ /元件·h; 长期(在轨运行 3 年以上的卫星)失效率为  $1 \times 10^{-9}$ /元件·h。根据不同测量特点, 传感器在连续工作条件下, 其平均无故障时间(MTBF)应为  $(10 \sim 500) \times 10^{-3}$ h。



## 2. 研制特殊品种和规格的传感器

(1) 特殊品种传感器,如用于弹头载入时受到气动摩擦加热时检测的烧蚀传感器(测温  $3000^{\circ}\text{C}$ , 马赫数高达  $3\text{Ma}$ );用于导弹、卫星及运载器的气动加热测量的热流传感器(最大测量值达  $3000\sim 3500\text{W}/\text{cm}^2$ );以及航天用的前视红外传感器、红外焦平面阵列和精密制导用的红外制导传感器等。

(2) 特殊规格传感器,如检测聚热介质的高温传感器( $2000^{\circ}\text{C}\sim 2800^{\circ}\text{C}$ )和暴冷介质的低温传感器( $-253^{\circ}\text{C}\sim 183^{\circ}\text{C}$ );大量程( $106\text{g}$ )的振动、加速度传感器和大量程( $1000\text{MPa}$ )压力传感器。

## 3. 研制新一代高水平的传感器

研制新一代的高水平传感器包括:

- (1) 微传感器,如重量小于  $1\text{g}$ 、功耗为几毫瓦的各类传感器;
- (2) 诊断传感器(具有自检、自校正功能);
- (3) 军用机器人用的智能传感器;
- (4) 三维视觉传感器;
- (5) 模糊传感器;
- (6) 高精度传感器;
- (7) 超导传感器;
- (8) 红外 CMT 凝视阵列及 CMT 凝视焦平面阵列;
- (9) 高精度光纤陀螺等。

### 3.4.2 典型军用传感器

按军用传感器在装备中的作用和特点分为外部传感器和内部传感器两类。用于探测军用装备外界信息的传感器称为外部传感器,如用于目标探测、精确打击、姿态控制的光电传感器、红外传感器和光纤陀螺等;而所有检测与控制内部的各子系统、各部件、参数的传感器均为内部传感器,如用于各类发动机系统、火控系统和监控系统的力学量传感器、温度传感器和光电传感器等。在实战中,各类武器装备一方面靠外部传感器快速发现与精确测定并打击敌方目标;另一方面靠各种内部传感器保证武器装备本身处于最佳状态,发挥最大效能。因此,两类传感器同等重要。

传感器是一项军民两用的高技术,军用传感器是传感器产业中的一个重要分支。与民用传感器相比,军用传感器具有品种结构特殊,使用环境恶劣,技术指标高,质量水平高(产品的一致性、稳定性和可靠性)等特殊要求,因而研制生产难度大。近 10 年来,在微电子技术、微机械加工技术、纳米技术以及新型材料科学等高技术的推动下,传感器技术已从单一的物性型传感器进入功能更为强大,技术高度集成的新型传感器阶段。

与一般意义上的传感器类似, 军用传感器已进入新的发展阶段, 其典型特征是微型化、多功能化、数字化、智能化、系统化和网络化。军用传感器也必将对军用电子装备的发展起到先导和促进作用, 下面介绍几种典型的军用传感器。

### 1. 微型传感器

微型传感器是指芯片的特征尺寸为微米级, 采用微电子机械加工制作的各类传感器的总称, 是近代先进的微电子机械系统 (MEMS) 中的重要组成部分。工业发达国家的微型传感器发展迅速, 且生产工艺成熟, 现在已形成产品和正在研究中的微型传感器有压力、力、力矩、加速度、速度、位置、流量、电量、磁场、温度、气体、湿度、pH 值、离子浓度、微型陀螺以及无线网络传感器等, 产品质量达到很高水平。

例如, Tronic 公司采用表面微机械加工技术在直径为 100mm 的 SOI 基片上制作了 5500 多个电容式压力敏感元件, 其压力测量范围为 65kPa~145kPa, 灵敏度为 1pF/100 kPa, 准确度可达 1% FS, 产品尺寸为 0.5mm×20mm; 美国研制出一种用 3 个 MEMS 陀螺和 3 个 MEMS 加速度计组成的微型捷联式惯性导航系统样机, 尺寸仅为 2cm×2cm×0.5cm, 质量为 5g, 功率小于 1W, 它的体积、质量、耗电功率、价格和小型惯性导航系统之比包括: 体积比为 0.012%, 质量比为 0.12%, 耗电功率比为 4.2%, 价格比为 2%; 美国研制的另外一种 MEMS 速度计能承受火炮发射时产生的近 105gn (1gn=64.8mg) 的冲击力, 已经为某些制导导弹的制导系统提供了经济可靠的解决方案。

### 2. 红外传感器

红外传感器的突出优点是以被动方式工作, 有利于抗干扰和隐蔽。红外探测是在 1μm~3μm、3μm~5μm 和 8μm~14μm 三个红外辐射窗口进行的。单元红外探测器如 InSb、HgCdTe、非本征锗和硅以及热释电探测等工艺成熟, 早已商品化, 且已在军事装备中得到应用。多元线列探测器也已商品化, 其 PbS 探测器已达 2000 元, 非本征硅已达 10 万元。红外焦平面技术是目前发展的重点, 主要有 InSb、HgCdTe 以及 PtSi 等阵列技术。其中 PtSi 焦平面阵列已制成 1040×1040 元、1968×1968 元的大型高密度集成阵列, 而 HgCdTe (8μm~12μm) 由于性能优良是目前 8μm~14μm 波段最受重视的红外探测器, 多元阵列的 HgCdTe 探测器已日趋成熟, 已有 18×128 元和 256×256 元的产品。

今后一段时间内, 红外焦平面阵列技术还会得到大力发展, 其阵列规模将越来越大, 最终将成为智能化红外焦平面器件。同时, 非制冷红外焦平面阵列 (如辐射热计、热电探测器阵列等) 以及以半导体超晶格量子阱材料的多种新型红外探测器将进一步发展。

### 3. 智能传感器

凡具有一种或多种敏感功能、数字量输出、信息存储和记忆、逻辑判断、双向通信、决策、自检、自校准、自补偿、自诊断和数值处理等功能的器件称为智能传感器。目前,

研制成功的智能传感器仅具有上述功能中的一部分,其代表性产品有:① 美国 Honeywell 公司的 DSTJ-3000 智能压力变送器;② ParScientific 公司的 1000 系列数字式石英智能化传感器;③ 智能加速度传感器;④ 智能红外传感器等。现在一些国家正在研究开发可以识别物体形状的触觉传感器,以及能分辨不同气体的嗅觉传感器。

随着科学技术的发展,智能传感器的功能将逐步加强,它将利用神经网络技术、传感器信息融合技术、模糊理论等新技术,使传感器具有更高级的智能,可完成多维检测等复杂任务,应用前景更为广阔。

#### 4. 网络传感器

网络化传感器可以实现 TCP/IP 协议,使现场测控数据就近登临网络,在网络所能及的范围内实时发布和共享。近几年,采用蓝牙技术标准开发成功了一种无线网络化传感器。它与有线网络化传感器相比,安装位置不受任何限制,摆放灵活,且无须布线,不用电缆线,降低了成本,提高了系统可靠性,安装和维护非常简便。

美国 Crossbow Technology 公司采用蓝牙协议,成功开发了一种 Cross Net 传感器结构,其具有结构灵活、模块化,测量范围宽和使用方便等特点。早在 2002 年,该公司在美国年度传感器博览会上展示了可以配备各种传感器的小型无线模块,这些模块以 Cross Net 传感器结构为基础,利用无线通信使得相邻的多个模块可以自动构成一个网络,而且可将 1000 个以上的模块进行 Multihop 连接。这种模块使用 916MHz 频带,发送时工作电流为 12mA,最大发送距离为 60m,有材料显示该传感器已经在美军部队内部应用,效果良好。

### 3.4.3 军用传感器关键技术

军用传感器由于其特殊的作用地位,其技术要求有别一般的工业传感器,部分技术要求更高。由于研发研究的军用传感器品种较多,既有共性关键技术,又有每种传感器各自的关键技术。对于军用传感器而言,应着力从以下三个方面的进行技术突破,这些技术难度大,但对军用传感器的发展和应用有着重大的影响。

#### 1) 传感器设计技术

- (1) 基本型传感器(如压力、振动、温度和位移)CAD 技术;
- (2) 新型传感器的设计技术(含可靠性设计),主要有诊断传感器、智能传感器、微传感器和光纤陀螺等设计技术;
- (3) 耐恶劣环境传感器、特殊传感器的设计技术。

#### 2) 新型敏感材料的制备技术

- (1) 超微粒(纳米级)陶瓷敏感材料的制备技术;
- (2) 焦平面阵列传感器薄膜材料制备技术,包括利用 MBE、MOCVD 或 CBE 外延

工艺研究大面积衬底材料、超晶格量子材料和光伏型材料的制备技术;

(3) 高温大面积超导薄膜(YBCO 和 TBCCO 等)及其衬底材料的制备技术;

(4) 功能性光纤的制备技术。

3) 传感器关键制作工艺技术

(1) 长波段红外多元 CMT (180 元) 光导探测器线列技术;

(2) 红外焦平面阵列探测器技术(长波/中波红外和红外/紫外多波段多元探测器技术);

(3) 超导红外传感器的制作技术;

(4) 三维视觉传感器制作技术;

(5) 多功能传感器、诊断传感器、智能传感器以及耐恶劣环境传感器的制作技术;

(6) 复合材料中埋置光纤传感器及其智能复合结构的制作工艺技术;

(7) 微电子机械技术(MEMT)。

### 3.4.4 军用传感器应用情况

当今, 军用传感器在军事上的应用极为广泛, 可以说无时不用, 无处不用, 大到星体、两弹、飞机、舰船、坦克和火炮等装备系统, 小到单兵作战武器; 从参战的武器系统到后勤保障; 从军事科学试验到军事装备工程, 从战场作战到战略、战术指挥, 遍及整个作战系统; 从战争准备、战略决策等战争实施, 遍及战争的全过程, 而且必将在未来的高技术战争中进一步扩大作战的时域、空域和频域, 影响和改变作战的方式和效率, 大幅度提高武器的威力和作战指挥战场的管理能力。军用传感器在武器装备中的应用如图 3-27 所示。

美国的军用传感器处于世界领先水平, 并且已在天、空、海、陆平台的实战中得到应用。下面以微型传感器、红外探测器和光纤传感器为例, 说明美军军用传感器的应用情况。

#### 1. 微型传感器的应用

目前美军已经将微型传感器应用于侦察卫星、智能弹头、单兵作战以及分布式机器人等方面。侦察卫星方面, 微型传感器主要集中应用在微型侦察卫星(包括微型卫星、纳型卫星和皮型卫星等)。2002 年 2 月, 美国成功地将世界上第一颗皮型卫星(小于 1kg)发射到离地面 750km 的轨道上, 其外形尺寸为(1 in × 3 in × 4 in, 注: 1 in = 0.0254m), 质量仅为 245g。另美国研制成功一个微尘卫星(小于 500g), 装有 7 个不同轴向的传感器, 包括 2 个磁传感器, 2 个加速度传感器, 以及光、湿度和压力传感器。在智能弹头方面, 美国研制成功了一种高加速度的 MEMS 惯性传感器, 并已用于智能弹头和钻地弹头中, 其抗震能力足以使弹头钻入地下后, 仍能对其进行制导、控制并引爆。微型传感器

也已用于美国陆军单兵作战的多功能电子设备：该装置安装在士兵身上的各个部位，包括各类 MEMS 传感器及其测控系统，主要有智能头盔（包括夜视仪、红外/激光瞄准器等）、能有效地提高士兵作战能力，已于 2003 年将逐步装备用于陆军单兵作战。在分布式机器人方面，美国军方列入研究计划的装有多种微型传感器的各类军用机器人有 100 多种，其中已投入实际使用的有机器人坦克、自主式地面车辆、扫雷机器人、武器装备自动故障与排除系统等。

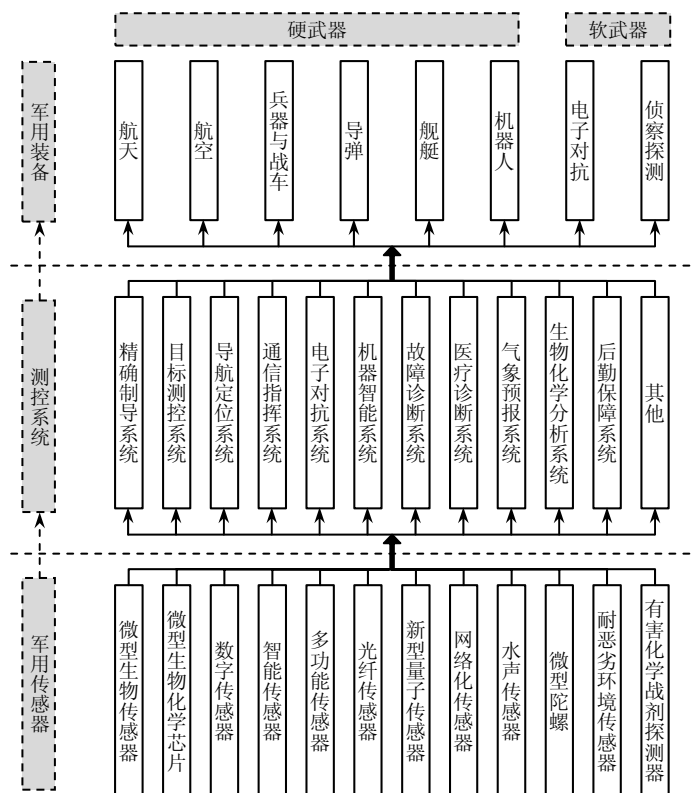


图 3-27 军用传感器在武器装备中的应用

## 2. 红外探测器的应用

美军应用红外探测器主要集中在弹道导弹预警和机动平台探测两方面。在战略弹道导弹的预警方面主要是应用红外遥感。为了适应未来战争的需要，美军于 1994 年提出建立探测与跟踪导弹发射的新一代卫星监视系统，以取代以前的 DSP 计划。该计划称为 SBIRS 计划（天基红外系统），由高轨与低轨卫星系统组成。高轨由 4 颗静止轨道卫星、2 颗大椭圆轨道卫星组成，主要用于探测与跟踪处于助推段的弹道导弹；低轨系统计划用 24 颗卫星组成，用于捕获与跟踪中段飞行的导弹，SBIRS 计划预算 230 亿美元。高轨系统计划在 2004 年首发，低轨系统在 2006 年首发，整个系统预计 2020 年部署完毕。SBIRS

将具备同时跟踪战略与战术弹道导弹的能力,采用全新设计的红外传感器,高轨卫星使用扫描与凝视传感器,低轨卫星使用捕获与跟踪传感器,使卫星能快速发现小型战术弹道导弹和跟踪较弱信号,并采用复合星座设计,从而提高对各种导弹的发现能力,扩大跟踪范围,尤其是中段跟踪,实现全过程监视与预警。在机动平台探测方面,主要是在舰艇、飞机及车辆等机动平台上装载红外探测器,用于夜间短、中、长距离战场红外识别系统,机载、车载和舰载前视红外(FLIR)系统,机载红外大面积战场实况侦察、红外搜索与跟踪系统,以及战术武器的精确制导等。其突出优点是以被动方式工作,有利于抗干扰和隐蔽。例如,美国休斯飞机公司为汉森(Hanscen)空军基地研制了 $488\times 512$ 元PtSi阵列,用于非视线性战术制导导弹。F-22装备了新型的机载红外搜索与跟踪系统,实现了全被动式搜索与跟踪,不必用雷达,提高了F-22的隐身能力。

### 3. 光纤传感器的应用

光纤传感器在军事电子信息技术中的应用主要集中在这几个方面:一是基于光纤陀螺的对飞行器、水下兵器、陆用战车的惯性制导和对运动载体的姿态控制;二是基于微振动传感器和光纤信息传输网,用于海洋防卫和反潜作战的光纤水听器传感器阵列网,以及用于核外炸核查和反核查光纤地震波监测网;三是基于温度、压力和振动传感器的智能结构,广泛用于水下兵器及航空航天等领域。同时,光纤陀螺成为惯性导航及控制领域的重点应用领域,它的应用可覆盖传统机电陀螺的所有领域,以及机电陀螺在惯性制导及姿态控制领域中可望而不可及的领域,带动了强冲击下的火炮控制、炮射制导武器系统的发展。近十几年以来,已有多种高性能光纤水听器系统问世。例如,美海军研究实验室(NRL)和Litton制导与控制公司共同研制的光纤水听器已装备在688级攻击潜艇上并做了公开演示。光纤传感器在军事上的其他应用包括地震波检测、核辐射检测、化学侦查和监测等。

对于中国来说,大幅度增强军用传感器的综合实力和为高技术战争中武器装备配套能力,使军用传感器的产品性能、质量达到国际同类产品水平,已经成为武器装备研制急需解决的重要问题。在基础应用研究方面,重点是新型敏感材料(纳米敏感材料、高温超导材料和功能型光纤材料等)、MEMS、智能传感器的CAD、CAM和CAT软件设计、微型传感器封装技术及MEMS可靠性技术等基础理论与技术的应用研究;在新品研制方面,重点是加强红外焦平面阵列(非致冷长波、多色凝视以及高温超导等)、高精密图像传感器、MEMS传感器、功能型光纤传感器、光纤陀螺、水声传感器、智能传感器、军用机器人用传感器、智能微尘和无线网络化传感器及各种耐恶劣环境的特种传感器的研制。



## 第4章

# 无线传感器网络通信传输技术

数据链路协议、路由协议和传输协议是无线传感器网络通信传输的核心协议，也是无线传感器网络军事应用亟需解决的关键问题之一。由于无线传感器网络节点能力受限，导致传统的数据链路协议、路由协议和传输协议并不能适用于无线传感器网络。因此，需要结合无线传感器网络的应用背景，设计低功耗、高性能通信传输协议，以支持无线传感器网络军事应用。本章将结合无线传感器网络军事应用特点，分析数据链路协议、路由协议和传输协议设计过程中的难点问题和关键技术，总结和梳理一些有代表性的通信传输协议，为无线传感器网络军事应用通信传输关键技术突破和发展提供理论基础。



## 4.1 概述

参考开放式系统互连网络参考模型, 结合无线传感器网络组织构成、规模及特点, 可以将无线传感器网络的通信协议层划分为物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层五个协议层。其各层功能如下所述。

(1) 物理层负责数据信号的调制, 编/解码和同步控制, 传感器节点要求物理层具有简单、低成本但健壮的信号调制和无线收/发技术。

(2) 数据链路层负责数据成帧、帧监测、介质访问控制 (Medium Access Control, MAC) 和差错控制。其核心是 MAC 子层, 负责节点通信过程中的信道访问。

(3) 网络层负责路由生成、维护和路由选择, 因为大多数传感器节点无法直接与汇聚节点通信, 需要通过中间节点以多跳路由的方式将数据传输到汇聚节点。

(4) 传输层负责数据流的传输控制, 主要通过汇聚节点采集传感器网络内的数据, 并使用卫星、移动通信网络等与外部网络通信, 是保证通信服务质量的重要组成部分。

(5) 应用层则是针对无线传感器网络的应用场景, 面向用户需求, 设计开发相应的应用软件和接口, 实现软/硬件资源管理、任务调度分配、监控显示管理、数据存储分发管理等功能。

在这五层中, 数据链路层协议、网络层协议、传输层协议是无线传感器网络通常意义上的通信传输协议, 而其他层一般不在通信传输协议的研究范畴。因此, 本章将对典型的无线传感器网络数据链路协议、网络协议、传输协议进行分析, 全面阐述各种协议的基本思想和采用的关键技术。

## 4.2 数据链路协议

如上所述, 数据链路层负责数据成帧、帧监测、介质访问控制和差错控制, 其目标是保证无线网络中点对点和对多点的连通可靠性, 保证源节点发出的信息可以完整、无误地到达目标节点, 从而形成可靠的、高效的数据传输。其中, MAC 协议决定了无线信道的使用方式, 通过传感器节点合理共享无线链路, 保证节点公平有效地分配有限的无线信道资源。同时, MAC 协议还决定了无线传感器网络的吞吐量、带宽利用率、公平性和延迟性等指标, 直接影响了整个网络的性能。因此, MAC 协议是保证无线传感器网络高效通信的关键协议之一。

### 4.2.1 MAC 协议的特点及分类

与传统无线网络相比, 无线传感器网络具有许多不同的特征, 如传感器节点能量、



存储、计算和通信能力有限,无线信道带宽稀缺,以数据为中心以及应用相关性强等。传统无线网络中使用的 MAC 协议并没有考虑无线传感器网络上述特征,因此很难将它们应用于无线传感器网络,因此必须结合无线传感器网络自身特点进行设计。通常,与其他 MAC 协议相比,无线传感器网络 MAC 协议应该具有以下三个特点。

(1) 能量高效。无线传感器网络的节点一般是由电池、纽扣电池等提供能量,而且在大多数情况下电池能量通常难以进行补充。因此,为了保证无线传感器网络长时间有效地工作,MAC 协议在满足应用要求的前提下,必须尽量节省传感器节点的能量消耗。

(2) 可扩展性。无线传感器网络的规模通常比较大,由于节点能量、周围环境等因素的影响,经常导致传感器节点数目、节点分布密度等在网络生命周期内不断变化;同时,节点的位置也会移动、新节点也会随时加入网络,这些因素都会导致网络拓扑结构不断动态变化。因此,MAC 协议必须具有良好的可扩展性,以适应这种动态变化的拓扑结构。

(3) 良好的网络效率。网络效率包括无线传感器网络的公平性、实时性、信道利用率以及网络吞吐量等。其中,公平性是为每个传感器节点提供公平的信道访问机会,同时也为了均衡所有传感器节点的能量消耗;实时性、信道利用率以及网络吞吐量与网络具体应用相关,为传感器节点周期性监测信息和事件驱动性监测信息高效传输提供保证。

在传统无线自组织网络中,节点能量通常能够连续供应,整个网络拓扑相对稳定。因此,传统无线自组织网络中的 MAC 协议重点考虑的是节点使用信道的公平性,带宽利用率和传输的实时性等。但在无线传感器网络中,由于传感器节点能量供应问题没有得到很好的解决,降低节点能量消耗成为 MAC 协议设计首要考虑的因素。由此可见,无线传感器网络 MAC 协议与传统无线自组织网络的 MAC 协议重点考虑的因素正好反序,能量效率与可扩展性是无线传感器网络最主要的性能指标,公平性、信道利用率等网络效率是其次要考虑的因素。此外,MAC 协议还应该基于不同的应用和需求进行相关参数的优化以及性能指标的折中。

基于无线传感器网络 MAC 协议的特点,研究人员从不同的角度入手,提出了多种 MAC 协议,并进行了初步应用尝试,获得了大量的研究成果。但是由于无线传感器网络应用的相关性和多样性,基于不同场景所设计的 MAC 协议对网络性能指标会有不同的侧重,因此为便于归纳总结,深入学习研究,有必要对现有的 MAC 协议进行分类总结。

对 MAC 协议的严格分类是非常困难的,针对不同的原则,MAC 协议有不同的分类方法。综合目前提出的 MAC 协议,无线传感器网络 MAC 协议可以按照以下不同的方式进行分类。不过需要注意的是,由于研究人员采用不同的策略或者多种策略组合来设计 MAC 协议,故同一 MAC 协议可分属不同的类型。

### 1. 基于 MAC 协议使用的信道数

根据物理层所使用的信道数,可将 MAC 协议分为单信道、双信道和多信道 MAC 协议。单信道 MAC 协议虽然对传感器节点结构的要求简单,但是无法有效解决能量有效性和时延的矛盾。而双信道和多信道的 MAC 协议能够比较好地解决这一问题,但是增加了传感器节点结构的复杂性。

### 2. 基于 MAC 协议分配的信道方式

根据信道的分配方式,可将 MAC 协议分为基于时分复用(Time Division Multiple Access, TDMA)的分配型、基于载波侦听多路访问(Carrier Sense Multiple Access, CSMA)的随机竞争型和混合型三种。其中基于 TDMA 的分配型 MAC 协议,通常会与频分复用(Frequency Division Multiple Access, FDMA)或码分复用(Code Division Multiple Access, CDMA)方式相结合,实现无冲突的强制信道分配。基于 CSMA 的随机竞争型 MAC 协议在传感器节点需要发送数据时,采用随机竞争方式使用无线信道,通常 CSMA 机制应尽量减少传感器节点间的干扰。混合型是把基于 TDMA 的分配型和基于 CSMA 的竞争型相结合,以适应网络拓扑、传感器节点业务流量的变化等需求。

### 3. 基于接收传感器节点的工作方式

根据接收传感器节点的工作方式,可将 MAC 协议分为侦听、唤醒和调度三种。在发送传感器节点有数据需要传输时,接收传感器节点的不同工作方式直接影响数据传输的能效性和接入信道的延迟等性能。接收传感器节点的持续侦听,在低业务的无线传感器网络中,会造成节点能量的严重浪费。因此通常会采用周期性的侦听睡眠机制,以降低传感器节点能量的消耗,但是这样就引入了时延。为了进一步降低空闲侦听的开销,发送传感器节点可以采用低能耗的辅助唤醒信道发送唤醒信号,以唤醒一跳邻居传感器节点。在基于调度的 MAC 协议中,接收传感器节点接入信道的时机是确定的,即传感器节点已知何时打开其无线通信模块,从而避免了能量的浪费。

### 4. 基于 MAC 协议采用的控制方式

根据 MAC 协议采用的控制方式,可以将 MAC 协议分为分布式执行的 MAC 协议和集中控制的 MAC 协议。这类协议直接与无线传感器网络的规模相关,通常是在大规模的网络中采用分布式执行的 MAC 协议。

不过相对来说,MAC 协议较为主流的分类方法是按照信道分配方式来划分的,这也是一种比较符合无线通信本质的分类方法。因此,本书采用根据 MAC 协议分配信道的方式进行分类,如图 4-1 所示,从竞争型、分配型及混合型三种类型入手,介绍目前比较有代表性的 MAC 协议,阐述各种协议的基本思想以及采用的关键技术,在此基础上对协议的性能归纳总结。

### 4.2.2 竞争型 MAC 协议

基于竞争的 MAC 协议是一种采用按需使用信道的随机访问 MAC 协议，其基本思想是当传感器节点需要发送数据时，通过竞争抢占的方式使用无线信道，如果竞争信道期间，发送的数据产生了碰撞，就按照某种策略重发数据，直至数据发送成功或放弃发送。竞争型

MAC 协议的优点包括：由于竞争型 MAC 协议是按需分配信道，因此这种协议能较好地满足节点数量和网络负载的变化；其次，竞争型 MAC 协议能较好地适应网络拓扑的变化，具有良好的可扩展性；最后，竞争型 MAC 协议不需要复杂的时间同步或集中控制调度算法。本节介绍几种典型的无线传感器网络竞争型 MAC 协议，包括 S-MAC (Sensor MAC) 协议、T-MAC (Timeout MAC) 协议、WiseMAC 协议和 Shft 协议。

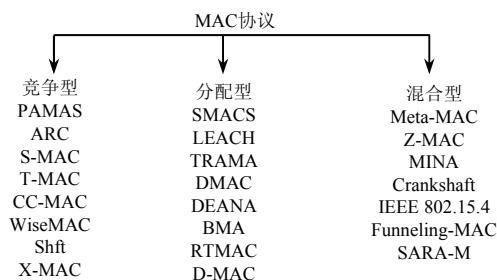


图 4-1 MAC 协议概览

#### 1. S-MAC 协议

S-MAC 协议是 2002 年由 Ye 等人提出的一种基于竞争的无线传感器网络 MAC 协议。该协议继承了 IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function) 和 PAMAS (Power Aware Multiaccess With Signaling) 协议的基本思想，并在此基础上以无线传感器网络的能量效率为首要设计目标加以改进，通过采用低占空比的周期性侦听和睡眠调度较好地解决了空闲侦听的能量消耗，同时兼顾了无线传感器网络的可扩展性，为低功耗无线传感器网络开发及应用提供了支撑。

##### 1) 基本思想

S-MAC 协议是基于 CSMA 机制的 MAC 协议，其基本思想是通过引入节点周期性睡眠和侦听机制实现节能，其冲突避免机制类似于 IEEE 802.11 DCF，采用物理载波侦听和虚拟载波侦听两种方式降低冲突发生概率，使用 RTS/CTS (Request To Send/Clear To Send) 握手机制避免隐藏终端问题。

当传感器节点在开始工作以后，首先侦听信道至少一个周期，在该时间内，节点侦听信道中的同步 (SYNC) 消息、RTS 以及 CTS 消息，如图 4-2 所示。其中 SYNC 消息为邻居节点广播，其中包含了该邻居节点的调度时间信息。如果节点从某个邻居节点处接收到同步消息，则该节点按照该调度时间表对自己的休眠和唤醒时间进行更改，并在该邻居节点的下一个侦听时段广播自己的同步消息；若其在侦听时段内没有收到任何同步消息，则使用默认的调度时间表并广播自己的同步包。节点在进入侦听状态后，若接收到来自邻居节点的同步消息，则节点从该消息中提取邻居节点的 ID 及调度时间表等信息，将其分别存储在节点的邻居表以及时间表中，另外节点需要周期性地广播同步分组，

以保证在邻居节点之前时间的同步。在同步消息的收/发完成后，由于 S-MAC 使用 RTS/CTS 握手机制来减少数据发送时的碰撞和隐藏终端的问题，节点若侦听到来自邻居节点的 RTS 消息后，会立即回复 CTS 消息，此后这两个节点开始进行数据交换，该数据交换取决于信道竞争时的回退时间和数据长度，可以在侦听时段结束之前完成，也可能在随后的休眠时段完成，节点在数据交换完成后进入休眠时间。如果节点在侦听时段没有收到自己的 RTS 分组，则立即进入休眠。节点在确定了调度时间表后，开始周期性的侦听和休眠，并在侦听时段发送和接收数据。

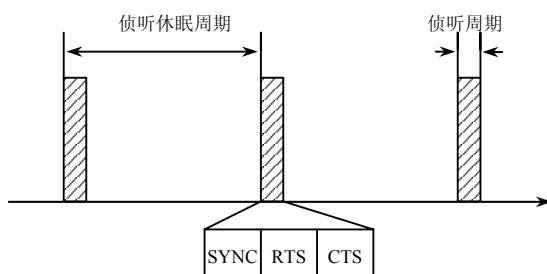


图 4-2 MAC 原理图

S-MAC 协议采用周期性休眠和侦听的方法减少空闲侦听带来的能量损耗，相比较于 IEEE 802.11 DCF 协议有了很大的改善；此外，S-MAC 的优点还在于当某个节点处于发送状态时，其数据帧中的特殊字段让每个与此次通信无关的邻居节点进入休眠状态，从而减少邻居节点的空闲侦听，同时因为邻居节点采用相同的调度时间表，方便节点之间形成虚拟簇。然而，休眠机制的引入也导致了数据传输延迟的增大，以及网络吞吐量的下降。

## 2) 关键技术

S-MAC 协议中主要采用了周期性侦听和休眠机制、消息冲突和串音避免机制、长消息传递机制三项关键技术。

### (1) 周期性侦听和休眠机制。

S-MAC 协议中减少能量消耗的最主要方法是采用了周期性侦听和休眠机制，即每个传感器节点周期性地进入休眠状态。在休眠状态下，传感器节点关闭其收/发电路等以节省能量消耗，并设置一个定时器，在一段时间后将其唤醒，进入侦听状态。在侦听状态下，传感器节点根据发送和接收的需求判断是否需要与其他传感器节点进行通信。S-MAC 协议中每一个传感器节点采用相同的占空比进行周期性侦听和休眠，一个完整的侦听和休眠周期称作一帧，每一帧以侦听阶段开始，然后是休眠阶段。

为了便于相互通信，相邻传感器节点之间应该尽量维持侦听/休眠调度周期的同步，即相邻传感器节点在同一时间打开无线收/发机进入侦听阶段。相邻节点间侦听/休眠调度周期的同步过程如下：相邻节点间是通过 SYNC 消息来实现同步的，当传感器节点启动工作时，首先侦听一段固定长度的时间，如果在这段侦听时间内收到相邻节点的 SYNC

消息 (SYNC 消息中包含发送节点的 ID 和它的下一次休眠调度信息), 则将其的休眠调度信息设置为与邻居节点相同, 并在等待一段随机时间后广播它的休眠调度信息。其中, 在这段侦听时间内, 会出现如下两种情况:

① 若传感器节点收到多个邻居节点的不同休眠调度信息, 此时可以选择传感器节点第一个接收到的邻居节点的休眠调度信息, 同时将所有收到的休眠调度信息记录到一张时间调度表中。

② 若传感器节点没有收到其他节点的休眠调度信息, 则产生自己的休眠调度信息并广播。

传感器节点在广播自身休眠调度信息后, 如果收到了相邻节点的休眠调度信息, 这时又分两种情况:

① 如果这个节点没有其他的相邻节点, 那么它就放弃当前的休眠调度信息, 而采用相邻节点的休眠调度信息。

② 如果这个节点已经采用了某相邻节点的休眠调度信息, 并且得知其他几个节点也采用此休眠调度信息, 那么节点就同时采用这两种休眠调度信息 (采用两种休眠模式, 即在两个时间段休息。例如, 该节点可在 7:00—8:00 休眠, 同时也可在 10:00—11:00 休眠)。

可以看出, 通过侦听/休眠调度周期的同步, 具有相同休眠调度信息的节点形成一个簇, 边界传感器节点采用两个或多个休眠调度信息, 如图 4-3 所示。

S-MAC 协议通过支持传感器节点采用多种休眠调度信息, 来形成不同的虚拟簇, 从而使得 S-MAC 协议具有良好的扩展性, 使得网络能够在多跳的情况下正常工作。同时, 为了适应新加入的传感器节点, 每个传感器节点都要定期广播自己的休眠调度信息, 使新节点可以与已经存在的邻居节点保持同步。

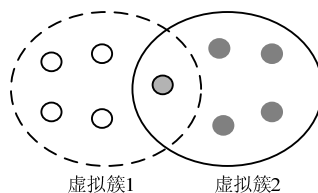


图 4-3 相同调度信息节点构成的虚拟簇

## (2) 消息冲突和串音避免机制。

S-MAC 协议使用侦听/休眠占空比来达到节省能量的目的, 休眠调度信息控制着节点休眠和侦听的时间。从这方面来看 S-MAC 协议与 TDMA 协议类似。但是, 考虑到传输上的控制以及碰撞的避免, S-MAC 协议是一个以竞争为基础的时隙接入类 MAC 协议, 非常类似 IEEE 802.11 DCF 协议, 尤其是虚拟载波侦听技术、物理载波侦听技术和 RTS/CTS 分组握手机制。

在虚拟载波侦听中, 每个发送数据包都包含一个时间域, 称为网络分配矢量 (Network Allocation Vector, NAV), 用于指示节点发送数据将持续的时间。当其他节点接收到这个数据包时, 通过 NAV 就会立刻知道自己应该避让多久才可能发送数据, 同时随着数据包的不发送, NAV 的值也在不断被刷新, 直至 NAV 的值为零。因此, 节点在发送数据前,

首先检查 NAV 的值，若 NAV 的值为非零时，即表示无线信道被其他节点占用，节点可以继续保持休眠状态。若 NAV 的值为零时，节点则需要进行物理载波侦听，通过在物理层侦听检测信道是否空闲，当虚拟载波侦听和物理载波侦听都表明信道空闲时，则该节点发送数据。

S-MAC 协议还定义在发送广播数据包时，并不使用 RTS/CTS 握手机制，而在发送单播数据包时，使用 RTS/CTS 握手机制，同时以 RTS-CTS-Data-ACK 的顺序进行数据传输。在节点间成功交换 RTS 和 CTS 消息数据后，发送节点和接收节点将在正常的休眠阶段进行数据传输，直到数据传输结束，节点才进入休眠状态。

S-MAC 协议使所有发送节点和接收节点的邻近节点，分别从 RTS 或者 CTS 消息中得知无线信道是否有数据传输及传输持续的时间，这就有效避免了相邻节点不必要地侦听其后的数据包和 ACK 消息，从而有效避免了空闲侦听时的能量消耗，即称之为串音避免。这种串音避免机制也减少了节点间的消息冲突，但是并不能完全避免，如两个邻近节点完成载波侦听后在同一时间开始传输数据，消息冲突仍然会发生。

(3) 长消息传递机制。

通常，无线传感器网络内部数据处理需要完整的消息，因此 S-MAC 协议利用 RTS/CTS 机制，一次预约发送整个消息的时间。同时考虑到无线传感器网络环境恶劣，节点通信能力有限，无线信道误码率高等特点，S-MAC 协议又将一个长消息分割成几个短消息在预约的时间内突发传输。为了能让邻居节点及时获得通信过程剩余时间，每个数据分组都带有剩余时间域，如图 4-4 所示。同时为了提高传输的可靠性，接收节点对每一个接收的短消息都要发送一个应答消息，如果发送节点没有接收到应答消息，则立即重传该短消息。



图 4-4 长消息传递机制

从图 4-4 可以看出，通过 RTS 消息发送端一次预约了整个消息的发送时间为 30ms，同时将时间存储于对应消息的时间域中，在整个传输过程中，Data 和 ACK 都带有通信剩余时间的信息，这样邻居节点就可以根据此时间信息进行串音避免。

2. T-MAC 协议

S-MAC 协议采用周期性侦听和休眠机制，除了发送长消息外，节点的侦听和休眠周期是固定的。然而在实际的无线传感器网络中，侦听和休眠的时间长度与占空比是与网络负载的大小以及具体的应用需求密切相关的。负载越大时，允许休眠的时间越短，否

则会造成较大的消息延迟；反之，休眠时间就应该相应增加，不然就会因侦听时间过长而导致大量能量的浪费。利用传感器节点动态调整休眠时间的思想，Dam 等在 2003 年提出了 T-MAC 协议来改善 S-MAC 协议性能。

### 1) 基本思想

T-MAC 协议就是针对上述问题而提出的一种竞争型 MAC 协议。其基本思想是在保持休眠周期长度不变的基础上，根据网络负载情况和应用需求动态调整侦听时间的长度，并采用突发方式发送信息，以减少空闲侦听时间。T-MAC 协议与 S-MAC 协议休眠机制的比较如图 4-5 所示。

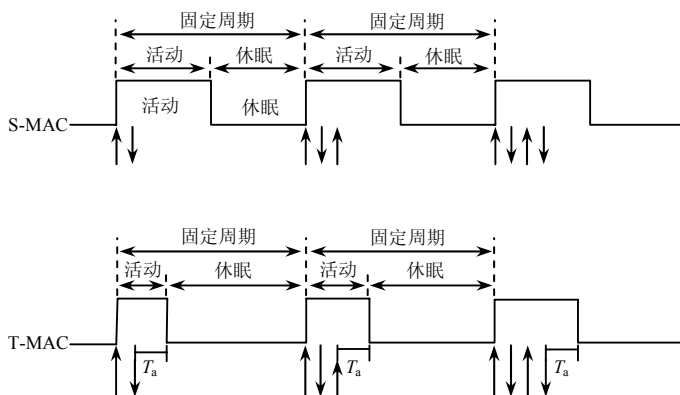


图 4-5 T-MAC 协议与 S-MAC 协议休眠机制的比较

在 T-MAC 协议中，传感器节点被周期性唤醒，进入活动期与相邻的传感器节点进行数据通信，然后进入休眠状态，直至下一周期的开始。节点之间进行单播通信仍然按照 S-MAC 协议使用的 RTS-CTS-Data-ACK 交互方法，用于保证避免冲突和进行可靠传输。

在活动期间，传感器节点保持侦听，并尽可能地发送所需传输的数据消息。如果在指定的时间段  $T_a$  内没有发生需要传感器节点处理的“激活事件（Activation Event）”，节点的活动状态立即结束，并进入休眠状态。其中激活事件是指：

- (1) 周期帧定时器触发周期性调度唤醒事件；
- (2) 物理层信道上检测到有通信在进行；
- (3) 物理层从无线信道上收到数据包；
- (4) 传感器节点的 Data 数据包或 ACK 消息发送完成；
- (5) 通过侦听 RTS/CTS 消息，确认相邻节点间数据交换已经结束。

### 2) 关键技术

T-MAC 协议中主要采用了三项关键技术：周期性侦听同步、RTS 操作和  $T_a$  值的选择、未来请求发送和满缓冲区优先。

## (1) 周期性侦听同步。

在 T-MAC 协议中, 传感器节点进行周期侦听采用与 S-MAC 协议相同的同步机制, 通过周期性发送 SYNC 帧来保证传感器节点之间的同步。具体过程为: 传感器节点上电后, 首先进行侦听, 如果该段时间内传感器节点没有接收到 SYNC 帧, 则传感器节点选择默认调度方式, 并广播该调度方式。若该时间段内传感器节点接收到 SYNC 帧, 则传感器节点采用该调度方式, 设置下一次进入活跃状态的时间为 SYNC 帧中的时间值减去接收 SYNC 需要的时间值。若传感器节点接收到不同的调度方式, 则传感器节点采用两种调度方式, 在最短时间内进入侦听状态。

(2) RTS 操作与  $T_a$  值的选择。

当传感器节点发送 RTS 消息后, 如果没有接收到相应的 CTS 消息, 那么有以下三种可能: 接收节点处发生碰撞, 没能正确接收 RTS 消息; 接收节点在此之前已经接收到串扰数据; 接收节点处于睡眠状态。因此, 传感器节点在第一次发送 RTS 消息后, 未能建立连接时, 应该再重复发送一次 RTS 消息, 如果仍然未能接收到 CTS 消息, 则转入休眠状态。

在每一个活动期间, T-MAC 协议按照突发方式发送数据,  $T_a$  决定了每一个周期最小的空闲侦听时间, 它的取值对于 T-MAC 协议性能至关重要。通常, 当邻居节点还处于通信状态时, 传感器节点不应该进入休眠状态, 因为该传感器节点可能是接下来信息的接收者。因此, 为了确保传感器节点能够发现邻居节点的串扰,  $T_a$  的取值必须保证传感器节点能够发现串扰 CTS, 所以  $T_a$  的最小值应该满足如下取值约束

$$T_a > C + R + T \quad (4.1)$$

式中,  $C$  为传感器节点 A 竞争信道时间,  $R$  为传感器节点 A 发送 RTS 消息的时间,  $T$  为 RTS 消息结束到传感器节点 B 发送 CTS 消息开始的时间。

T-MAC 协议  $T_a$  约束条件示意图如图 4-6 所示。

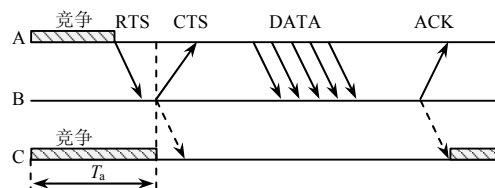


图 4-6 T-MAC 协议  $T_a$  约束条件示意图

## (3) 未来请求发送和满缓冲区优先。

无线传感器网络常有的数据传输方式是多个传感器节点向一个或多个汇聚节点进行单向数据传输, 如图 4-7 所示, AB 之间, BC 之间, CD 之间可以相互通信, 且假设数据传输方向是  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ 。如果节点 A 通过竞争获得了与节点 B 通信的机会, 节点 A 发送 RTS 消息给节点 B, 节点 B 回复 CTS 消息给节点 A。那么当节点 C 收到节点 B 发出



的 CTS 消息时, 会触发一个新的监听时间段, 使节点 C 保持监听状态。而节点 D 没有发现 AB 之间正在进行的通信, 由于无法触发新的激活事件, 节点 D 会进行睡眠。当 AB 之间通信结束时, 节点 C 竞争获得信道, 但由于节点 D 此时已经睡眠, 所以必须等到节点 D 在下一次调度唤醒时才能进行 RTS 与 CTS 交互。因此存在一个传感器节点准备向其邻居节点发送数据时, 邻居节点已进入睡眠状态的现象, 这里称这种现象为早睡。早睡问题经常造成数据传输的延迟。

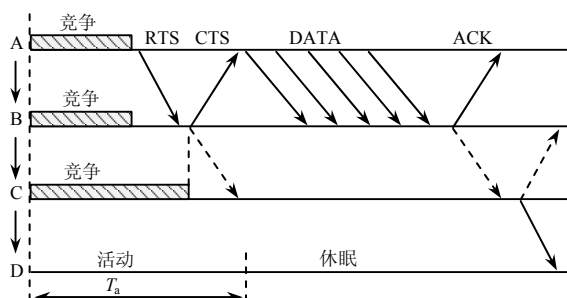


图 4-7 T-MAC 协议中早睡问题

为了解决早睡问题, T-MAC 协议提出了未来请求发送(Future Request-to-Send, FRTS)和满缓冲区优先(Full Buffer Priority)两种方法。其中, T-MAC 协议中未来请求发送方法如图 4-8 所示。

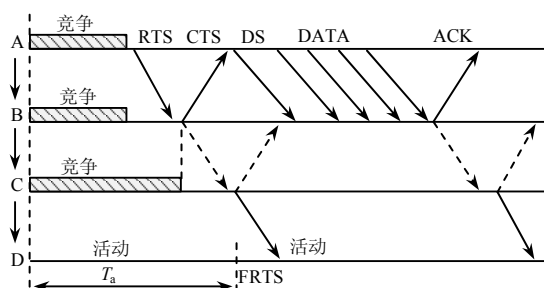


图 4-8 T-MAC 协议中未来请求发送方法

当节点 C 收到节点 B 发给节点 A 的 CTS 消息后, 立即向节点 D 发送一个 FRTS 消息, FRTS 消息包含节点 D 接收数据前需要等待的时间长度, 节点 D 在此时间内必须保持在侦听状态。由于节点 C 发送的 FRTS 消息可能干扰节点 A 发送的数据, 所以节点 A 需要将发送的数据延迟相应的时间, 因此节点 A 在接收到 CTS 消息之后发送一个与 FRTS 长度相同的 DS 消息, 该消息不包含有用信息, 只是为了保持节点 A 与节点 B 对无线信道的占用, 在发送 DS 消息之后, 节点 A 立即向节点 B 发送数据信息。由于 FRTS 机制是通过增加一个 CTS 时间来解决早睡问题的, 因此增加了控制开销, 降低了 T-MAC 协议的能量效率, 但是 FRTS 方法可有效提高网络吞吐量, 减少数据传输延迟。

满缓冲区优先方法的基本思想是当传感器节点的缓冲区接近占满时，对接收到的 RTS 消息不回复 CTS 消息，而是立即向缓冲区中数据包的目的节点发送 RTS 消息，以建立数据传输，其基本原理如图 4-9 所示。

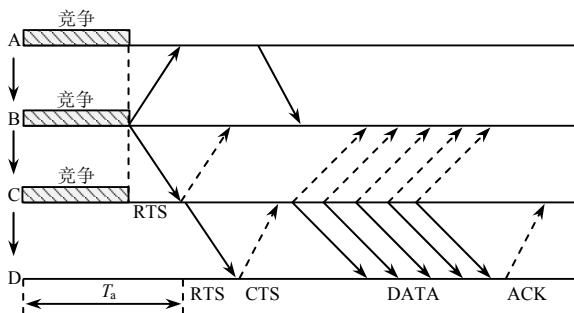


图 4-9 T-MAC 协议中满缓冲区优先方法

节点 B 向节点 C 发送 RTS 消息，节点 C 因缓冲区快占满不发送 CTS 消息，而是向节点 D 发送 RTS 消息，并传输数据给目标节点 D。这个方法的优点是减少了早睡问题发生的可能性，并起到一定的网络流量控制作用；缺点是在网络数据量较大时增加了冲突的可能性。

### 3. WiseMAC 协议

WiseMAC 协议是由 CSEM SA 的研究人员在 2004 年提出的，最初提出 WiseMAC 协议主要针对低功耗无线传感器网络平台，该协议是基于 CSMA 机制，并引入前导采样技术作为唤醒机制，不仅有效降低了传感器节点由于空闲侦听产生的能量消耗，还减少了节点间的串扰。

#### 1) 基本思想

WiseMAC 是基于 CSMA 机制的 MAC 协议，其基本思想是采用前导码采样技术作为唤醒机制，在不影响系统性能的前提下，使接收传感器节点用于空闲侦听信道的能耗最小。传感器节点在大部分时间都保持休眠状态，并采用周期采样信道忙闲状况的方式用于激活控制。当节点有数据分组发送时，先发送唤醒前导码用于唤醒接收节点，接收节点周期对这种唤醒前导码进行抽样侦听，当侦听到信道忙时，就继续侦听无线信道，直到数据分组发送完毕或信道转入空闲。如果没有侦听到前导码，则节点重新进入休眠状态。

唤醒前导码增加了节点用于无线收/发的能耗，为了最小化该项能量开销，节点应该获知所有相邻一跳节点的采样时间，确保发送节点能够在接收节点采样信道的时刻发送一个最小长度的唤醒前导码。因此，每个节点都必须建立和维护一份采样时间列表，记录所有相邻一跳节点采样信道的开始时间。在 WiseMAC 中，接收节点在每次回复的 ACK 消息中嵌入了需多长时间后开始下一次信道采样的内容，从而实现相邻一跳节点采样时间列表的更新，但采样调度表的保存和更新需要比较大的存储与控制开销。

## 2) 关键技术

WiseMAC 协议中主要采用了前导采样和前导采样最小化两种关键技术。

### (1) 前导采样技术。

前导采样技术就是在短时间内对信道进行采样以达到侦听的目的。无线传感器网络中所有传感器节点都保持相同的采样时间  $T_w$ ，但各传感器节点的采样调度是独立的。如果采样时侦听到无线信道忙，节点会继续侦听，直到接收到数据或者信道空闲。

在发送端，每一个数据包在发送之前都要发送一个唤醒前导序列，该序列的长度和采样周期的长度相等，以保证在数据部分到达时，节点处于侦听状态。同时为了减少 WiseMAC 协议的控制开销，该协议必须选择尽可能小的唤醒前导序列长度。

### (2) 前导采样最小化技术。

WiseMAC 协议采用的前导采样最小化技术就是根据邻居节点的抽样时间调度信息，选择最小长度的唤醒前导序列。其基本工作原理如图 4-10 所示，当发送节点 A 有数据需要发送时，首先等待一段时间，直到接收节点 B 载波侦听周期开始之前的某个时刻，才开始发送唤醒前导序列。为了使发送节点准确获得发送唤醒前导序列的时间，WiseMAC 协议要求每一个传感器节点维护一张其直接邻居节点的抽样时间调度信息表。基于该信息表，发送节点可以准确地使接收节点的抽样时刻落在唤醒前导码中间，并且由于节点的直接邻居节点个数通常比较少，因此抽样时间调度信息表占用的内存资源也不需要太多。

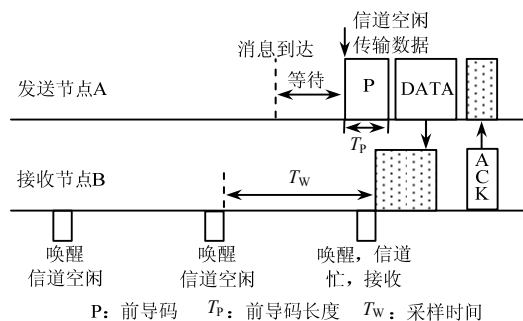


图 4-10 WiseMAC 协议前导采样最小化技术工作原理

通过前导码的引入和前导采样最小化技术，WiseMAC 协议有效减少了节点空闲侦听时间，降低了传感器节点的能量消耗。然而，在 WiseMAC 协议中存在不同相邻节点抽样调度不同的情况，由此会产生广播消息必须为每个直接相邻节点单独发送，使消息延迟值增大的情况，同时该协议也没有解决隐终端问题。

## 4. Sift 协议

Sift 协议是由 MIT 的研究人员在 2006 年提出的，它主要针对基于事件驱动的无线传

感器网络而提出的竞争性 MAC 协议。该协议采用 CSMA 机制,同时使用固定长度的竞争窗口,在每个竞争窗口的时隙内,通过非均匀概率分布来选择是否传输。不同于传统的基于窗口的 MAC 协议,Sift 协议充分考虑了无线传感器网络的以下三个特性:

(1) 无线传感器网络的空间相关性和时间相关性。为了保证事件监测的可靠性,通常会在监测区域部署多个传感器节点,利用节点的冗余性来保证事件监测的可靠性。这就导致同一事件发生时,多个邻近节点会同时监测到并发起通信请求,从而邻近节点就会竞争共享无线信道,形成同一事件传输的时间相关性。

(2) 不是所有传感器节点都需要报告事件。在许多无线传感器网络应用中,并不需要所有监测到事件发生的传感器节点发送事件信息,只要系统最终收到相关数据信息即可。

(3) 感知节点的密度是随时间变化的。无线传感器网络节点部署密度并不是统一的,当目标进入监测区域内,监测到目标的传感器节点会随时间的推移或目标的移动而不断变化。

基于事件驱动型无线传感器网络的特点,Sift 协议提出的设计目的为:当共享信道的  $N$  个传感器节点同时监测到同一事件并发起竞争时,Sift 协议必须在尽可能短的时间内保证  $R$  个传感器节点能够无冲突地发送事件的监测信息,同时抑制剩余  $(N-R)$  个传感器节点的信息发送。

#### 1) 基本思想

为了实现 Sift 协议提出的设计目的,Sift 协议采用的核心思想是:在固定长度的竞争窗口内,通过确定节点在每一个时隙选择发送数据的概率,使得监测到同一事件的多个传感器节点在竞争窗口的各个时隙内无冲突地传输消息。传感器节点在竞争窗口的每个时隙主要通过非均匀概率分布来选择是否发送,不同的概率分布决定了传感器节点的退让长度,通过非均匀概率分布能减少同一时间竞争无线信道的节点个数,保证一定概率的传感器节点能够无冲突地发送监测信息。

#### 2) 关键技术

Sift 协议的关键是对于固定长度的竞争窗口,传感器节点如何确定其自身发送数据的概率。通常发送数据的概率确定的过程为:如果传感器节点有信息需要发送时,则假想当前共有  $N$  个传感器节点与其竞争无线信道,如果在发送窗口的第一个发送时隙内,传感器节点本身不发送消息,也没有其他传感器节点发送消息,则传感器节点就减少假想的竞争发送传感器节点的数目,并相应地增加选择在第二个时隙发送数据的概率。如果传感器节点没有选择第二个时隙,而且在第二个时隙上仍然没有其他节点发送信息,则传感器节点继续减少假想的竞争发送节点数目,继续增加选择第三个时隙发送信息的概率,并依此类推。传感器节点在第  $r$  个时隙发送数据的概率  $P_r$  为

$$P_r = \frac{(1-\alpha)\alpha^{CW}}{1-\alpha^{CW}}\alpha^{-r} \quad r \in [1, CW] \quad (4.2)$$

式中,  $\alpha$  为分布参数 ( $0 < \alpha < 1$ ),  $P_r$  随着时隙  $r$  呈指数增长, 所以传感器节点在竞争窗口中靠后的时隙发送概率更大。如果传感器节点在选择时隙过程中, 发现有其他节点发送消息, 节点就要重新开始竞争过程。图 4-11 为 Sift 协议 A、B、C、D 四个传感器节点竞争时隙选择的过程。

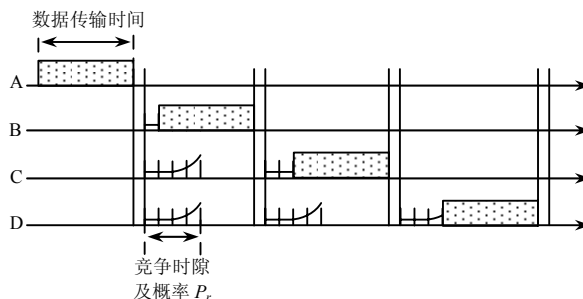


图 4-11 Sift 协议节点竞争时隙选择的过程

节点 A 选择了一个时隙发送数据, 则其他节点 B、C、D 只能在退避固定长度的竞争窗口后重新竞争选择新的时隙。每个时隙的发送概率按照式 (4.2) 计算, 如果在发送数据之前有其他节点赢得了该时隙, 则节点需要重新计算各个时隙的发送概率。

Sift 协议采用固定的竞争窗口大小和递增的非均匀概率分布选择时隙, 实现简单新颖, 有利于提高事件监测响应的实时性和带宽利用率, 适合冗余、竞争、空间相关的应用场景。与 S-MAC 和 T-MAC 协议类似, Sift 协议也是从发送节点考虑问题的, 对接收节点的空闲状态考虑较少, 因此没有充分考虑网络的能量效率。同时 Sift 协议需要邻近节点间保持时间同步, 适合分簇网络结构, 簇内节点距离比较近, 多个节点往往容易同时监测到同一个事件, 而且只需要部分节点将消息传输给簇头。因此, Sift 协议被广泛应用于分簇网络中。

### 4.2.3 分配型 MAC 协议

在竞争型 MAC 协议中, 随着无线传感器网络通信量的增加, 节点间控制包和数据包发生冲突的概率不断增加, 导致网络带宽利用率的降低, 同时数据的重传也会增加网络能量消耗。分配型 MAC 协议利用 TDMA、CDMA 和 FDMA 等技术, 将一个物理信道分为多个子信道, 并将子信道静态或动态地分配给需要通信的传感器节点, 有效避免了节点间数据传输的冲突、串音以及空闲侦听。分配型 MAC 协议的优点包括无冲突, 无隐藏终端问题, 易于休眠调度, 适合低功耗网络。本节主要介绍分布式能量感知节点激活 (Distributed Energy-Aware Node Activation, DEANA) 协议、流量自适应介质访问 (Traffic Adaptive Medium Access, TRAMA) 协议和 DMAC (Data-gathering MAC) 协议几种典型的无线传感器网络分配型 MAC 协议。

## 1. DEANA 协议

DEANA 协议是 Rajendran 等人在 2002 年提出的, 该协议是一种基于 TDMA 的分配性 MAC 协议。该协议并不是专门针对无线传感器网络设计的, 但其基本思想被许多基于 TDMA 的无线传感器网络 MAC 协议所借鉴, 因此有必要对其进行详细阐述。

### 1) 基本思想

DEANA 协议的初始设计目标是尽可能减少在一个特定时隙内非目的接收传感器节点的能量消耗, 其基本思想是: 将时间帧划分为周期性的调度访问和随机访问两部分, 如图 4-12 所示。其中周期性的调度访问部分由多个连续的数据传输时隙组成, 每个时隙都可以分配给特定的传感器节点用来传输数据。当传感器节点在其分配的时隙内传输数据时, 其他节点都处于休眠状态。随机访问部分是由多个连续的信令交换时隙组成, 用于发送或接收网络正常工作所需要的控制消息, 如传感器节点的添加、删除及时间同步等。在随机访问期间, 所有节点必须处于发送状态或接收状态, 因此随机访问部分的长度对传感器节点的能量消耗会产生比较大的影响。

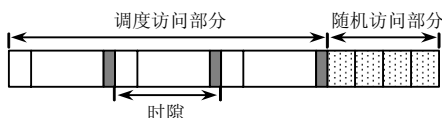


图 4-12 DEANA 协议的时间帧结构

### 2) 关键技术

与传统的 TDMA 协议相比, DEANA 协议通过在时间帧内的时隙中添加控制时隙和转换时隙来解决串音问题, 进一步降低节点能量消耗。如图 4-13 所示, 调度访问部分的每一个时隙又可以细分为控制时隙、数据传输时隙及转换时隙。

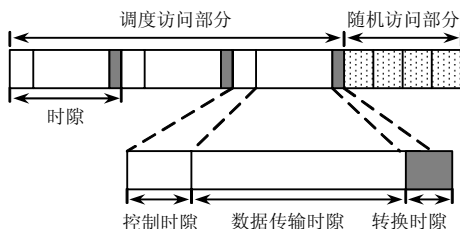


图 4-13 调度访问部分时隙细分结构

控制时隙相对于数据传输时隙而言长度很短, 当传感器节点需要在其分配的时隙内传输数据时, 则首先在其控制时隙内发送控制消息, 控制消息主要包括目的接收节点的身份信息, 用于告知相邻传感器节点是否需要接收数据, 然后再发送数据信息。在控制时隙内, 节点的所有邻居节点都必须处于接收状态, 如果传感器节点根据接收到的控制信息得知自己不是数据接收者, 则立即进入休眠状态, 以降低节点能量消耗。因此, 在数据传输时隙, 只有数据的接收者才会在整个时隙内保持接收状态。由于传输时隙通常

比较长,因此在传感器传输数据时,能有效降低不需接收数据节点的能量消耗。

DEANA 协议通过在数据传输时隙前添加一个控制时隙,使邻居节点在得知不需要接收数据时进入休眠状态,从而部分地解决了串音问题。但是由于控制时隙比较短,而该协议对节点的时间同步精度要求比较高,对于能量和计算能力都十分有限的传感器节点来说,实现难度比较大。

## 2. TRAMA 协议

TRAMA 协议是 Rajendran 等在 2003 年提出的基于 TDMA 的分配性 MAC 协议,其设计目标是实现无冲突、高能效的无线信道访问,同时保持较好的吞吐量、延迟和公平性等性能。根据实际流量,TRAMA 协议通过保证传感器节点使用预先分配的时隙,实现无冲突通信,让没有数据通信的传感器节点进入低能耗的休眠状态,从而减少冲突和空闲侦听导致的能量消耗。同时,通过基于节点流量信息的分布式选举机制,确定在每个时隙发送的节点,以获得较好的吞吐量、延迟和公平性等性能。

### 1) 基本思想

与传统的基于 TDMA 的 MAC 协议相比较,TRAMA 协议的时隙分配是基于流量的。其基本思想是:将时间划分为连续时隙,每个节点根据局部两跳内邻居节点的信息,采用分布式选举机制,确定每个时隙的无冲突发送节点和接收节点。同时通过避免给无流量节点分配时隙,以及让非发送和接收节点处于休眠状态,来达到降低节点能耗的目的。TRAMA 协议包括邻居协议(Neighbor Protocol, NP)、分配交换协议(Schedule Exchange Protocol, SEP)和自适应时隙选择算法(Adaptive Election Algorithm, AEA)。

TRAMA 协议将一个物理信道分成多个时隙,其时间帧被划分为交替的随机访问部分和调度访问部分两个部分。其中,随机访问部分又被进一步划分为多个较小的信令时隙,用于发送信息,负责完成网络维护及应对网络拓扑结构的变化;调度访问部分又被进一步划分为多个较小的数据传输时隙,用于完成信息数据的传输。其中,随机访问部分和调度访问部分的占空比依赖于网络的类型,在动态变化比较频繁的网络中,通常随机访问部分所占的时间相对较长。TRAMA 协议通过对时隙的复用,为数据和信令的传输提供信道,为了便于同步,通常信令传输时隙值为信令时隙位的整数倍。

### 2) 关键技术

TRAMA 协议中主要采用了 NP 协议、SEP 协议和 AEA 算法三项关键技术。

(1) NP 协议。NP 协议是在随机访问部分执行的,用于实现两跳范围内邻居节点信息的交互。首先,节点周期性地广播自己的控制信息,控制信息里包括自己的身份标志或编号,是否有数据需要发送,以及直接相邻节点的相关信息,其信令及数据帧头格式如图 4-14 所示。为了使节点间获得一致的两跳范围内拓扑结构和节点流量的信息,NP 协议要求在随机访问周期内的所有节点处于活跃状态,同时要求其多次广播其控制信息。

如果节点的邻居列表没有发生变化, 节点仍需要发送一个内容为空的消息, 用于告知相邻节点自己的存在; 如果在规定的时间内, 节点没有接收到某个相邻节点的消息, 则将该节点从其邻居信息列表中删除。

信令帧头

类型	源地址	目的地址	删除节点数	加入节点数	删除节点ID	加入节点ID
----	-----	------	-------	-------	--------	--------

数据帧头

类型	源地址	目的地址	超时	时隙序号	位图
----	-----	------	----	------	----

图 4-14 信令及数据帧头格式

在 TRAMA 协议中, 规定每一个节点具有唯一的节点编号, 因此各节点需要根据节点编号, 独立计算其两跳范围内所有节点在每一个时隙上的优先级, 一般节点  $n$  在编号为  $m$  的时隙内的优先级计算公式为

$$\text{priority}(n, m) = \text{hash}(n \oplus m) \quad (4.3)$$

式中,  $\text{hash}(\bullet)$  是一个伪随机哈希函数。由于节点间获得的邻居节点信息是一致的, 因此每一个节点独立计算的各节点在每一个时隙上的优先级也应是一致的, 由此可以确定自身在哪个时隙上的优先级最高。节点优先级最高的时隙称为赢时隙。

(2) SEP 协议。SEP 协议在调度访问部分执行, 并在两跳邻居节点间建立和维护相同的发送和接收调度信息。这个过程包括节点自身调度信息的生成和调度信息的广播。

节点自身调度信息的生成过程如下: 每个传感器节点根据上层应用产生数据的速率或提供的信息, 计算数据传输所需要的时间, 从而确定一个时间调度表间隔, 即一次调度所需要的时隙个数, 定义为  $T$ ; 然后在  $[t, t+T]$  内, 计算传感器节点在其两跳邻居范围内具有最高优先级的时隙, 即节点的赢时隙; 由于节点有可能在赢时隙内发送数据, 因此需要通过一个调度信息向其邻居节点通告其使用的时隙和数据的接收节点。如果节点没有数据要发送, 也需要通过一个调度信息通告其邻居节点, 它将放弃相关的时隙, 而其他节点此时可以使用空闲的时隙。通常在节点的每一个调度间隔内, 最后一个赢时隙是预留给节点广播其下一个调度间隔的调度信息。

调度信息的广播过程如下: 调度信息帧的广播通常不需要指定目的地址, 而是通过位图来指定接收者。在位图中, 每一位代表一个一跳邻居节点, 位图的长度等于节点的一跳邻居节点数。如果需要某个邻居节点接收数据时, 就将其对应的位置设置为“1”, 从而方便地实现单播、广播或组播。节点根据自身的赢时隙个数形成多个位图, 即位图的个数等于赢时隙的个数, 如果节点放弃某个赢时隙, 则将其对应位图的所有位置设置为“0”。调度信息帧的格式如图 4-15 所示。该帧格式中假设了节点有 5 个相邻节点, 5 个赢时隙数, 节点使用前两个时隙, 放弃第三和第四个时隙, 最后一个时隙按照规定必



须用作转换时隙，其对应位置全部设置为“1”，表示从该时隙开始新一轮的调度。为了保证所有节点调度信息一致，在变更时隙时，所有相邻节点必须处于接收状态。

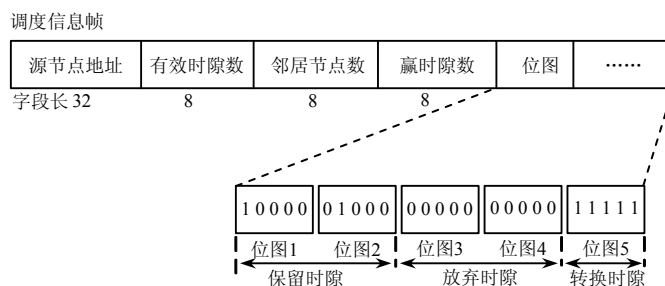


图 4-15 调度信息帧格式

(3) AEA 算法。AEA 算法运行于调度访问部分的每个时隙，用于确定所有两跳邻居节点的优先级，并根据当前两跳邻居节点的优先级和一跳邻居节点调度信息，确定节点在当前时隙上的状态是发送、接收或休眠。

该算法运行过程如下：首先删除没有任何数据要发送的节点，然后利用式 (4.3) 计算出每个时隙上优先级最高的节点，如果在给定的时隙  $m$  上，节点具有最高的优先级且有数据需要传输，则将其设置为发送状态；只有当节点是某一发送节点指定的接收节点时，该节点才处于接收状态；否则，节点进入休眠状态。

TRAMA 协议通过局部信息或分布式的协商，保证节点无冲突地发送数据，并使无数据收/发的节点处于休眠状态以降低能量消耗，同时也可以避免将时隙分配给没有信息发送的节点，提高了信道利用率。但是，该协议的 AEA 算法比较复杂，同时节点需要较大的存储空间来保存拓扑结构信息和邻居调度信息，相比于竞争型 MAC 协议，数据传输时延也比较大，因此该协议比较适合应用于收集周期性数据或监测传感器网络。

### 3. DMAC 协议

DMAC 协议是 USC 的研究人员在 2004 年提出的一种针对数据采集树结构 (Data Gathering Tree) 的 MAC 协议。在大多数无线传感器网络的应用中，主要的通信模式是多个传感器节点采集数据后，向一个汇聚节点进行传输，其传输路径形成了一个以汇聚节点为根节点的树形网络结构，即数据采集树结构。该协议主要基于 S-MAC 和 T-MAC 协议的思想，采用预先分配的方法来避免 S-MAC 和 T-MAC 协议中出现的睡眠延迟问题，通过引入一种交错的监听睡眠调度机制，来保证数据在多跳路径上的连续传输。

#### 1) 基本思想

S-MAC 协议和 T-MAC 协议采用周期性活动/休眠策略降低节点能量消耗，但是在数据在转发过程中会出现“走走停停”的传输停顿问题，这是由于传感器节点监测到的数据必须等到通信模块处于活动状态才能发送，在中间节点传递过程中，也必须等到下一跳节点处于活动状态才能进行数据转发。

为了减少多跳传输中因节点睡眠带来的数据传输延迟, DMAC 协议采用交错睡眠调度机制, 保证数据在树形结构上持续传输, 不被睡眠所中断。数据采集树和节点的交错唤醒方法如图 4-16 所示。该方法将节点周期划分为接收状态、发送状态和休眠状态, 并定义发送状态和接收状态所占用的时间相等, 设其为  $t$ 。每一节点根据其在数据采集树中的深度  $d$  来确定其唤醒时间偏移, 如深度为  $d$  的节点其相对于汇聚节点应提前  $du$  的时间唤醒。这样就使下层节点的发送时间对应于上层节点的接收时间, 从而使数据连续地从源节点传输到汇聚节点, 减少了网络中的传输延迟。

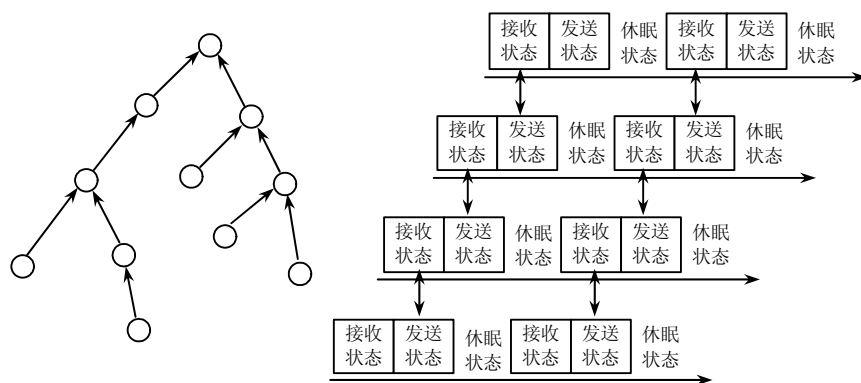


图 4-16 数据采集树和节点的交错唤醒方法

DMAC 协议并不像其他 MAC 协议采用 RTS/CTS 机制, 而是采用 ACK 应答机制, 以保障数据的传输。如果发送节点没有收到 ACK 应答, 则必须在下一个发送时间重发, 当重传次数超过 3 次就丢弃该数据包。

## 2) 关键技术

DMAC 协议中主要包含了自适应占空比机制、数据预测机制及 MTS 分组机制三项关键技术。

### (1) 自适应占空比机制。

如果传感器节点在一个发送周期内需要发送多个数据分组, 则该节点和树状路径上的上层节点就需要加大发送周期占空比, 以保证数据及时传输。DMAC 协议通过引入自适应占空比机制, 使发送节点与上层接收节点占空比实现自适应更新。该协议通过在数据帧的帧头加入一个标志位 (More Data Flag), 来标示节点是否有多个分组需要发送。当标志位设置为 1 时, 表示发送节点还有数据需要发送, 同时接收节点也需要在 ACK 帧头中加入相同的标志位, 当发送节点接收到带有标志位的 ACK 帧时, 表明接收节点已经准备好继续接收数据。通过上述分析可知, 节点调整占空比的条件是: 发送一个标志位为 1 的数据且接收到标志位为 1 的 ACK, 或者接收到一个标志位为 1 的数据。利用这种机制, DMAC 协议以较小的控制开销就可实现传输路径上的逐跳预约, 从而使收/发节点间占空比自适应调整, 提高了网络的数据传输效率。

### (2) 数据预测机制。

在数据采集树中,越靠近上层的节点,汇聚的数据越多,所以对树的底层节点适合的占空比并不一定适合中间节点。例如,节点 A 和 B 有共同的父节点 C,如果节点 A 和 B 在每个发送周期都只有一个数据包发送,当节点 A 通过竞争获得信道,并向父节点 C 发送数据,由于 C 只有一个数据包发送,所以此数据包的占空比标志位设置为 0,父节点 C 接收到 A 发送的数据包,并检测占空比标志位为 0,就发送一个占空比为 0 的 ACK,从而进入休眠状态。这样节点 B 的数据就需要等到下一个周期才能发送给父节点 C,由此增加了节点 B 的传输延迟。

为了解决上述父节点早睡问题,DMAC 协议引入了数据预测机制,即当父节点收到某个子节点的数据分组后,预测其他子节点仍有数据等待发送,因此父节点在休眠  $3u$  个周期后重新切换到接收状态。其中  $u$  为一次数据通信过程所需要的时间长度,其表达式为

$$u = BP + CW + DATA + SP + ACK \quad (4.4)$$

式中, BP 为每个节点在发送数据前先退避的固定时间, CW 为竞争窗口时间, DATA 为数据分组的传输时间, SP 为接收到数据的节点在等待一个短周期后恢复一个 ACK 应答, ACK 为 ACK 帧的传输时间。

如果父节点在休眠  $3u$  个周期后,接收到子节点的数据,就继续在休眠  $3u$  个周期后进行数据的接收,而当子节点接收到父节点发送给其他节点的 ACK 时,子节点就可知父节点在休眠  $3u$  个周期后进入唤醒状态,所以子节点也在休眠  $3u$  个周期后进入发送状态。

### (3) MTS 分组机制。

虽然自适应预测机制和数据预测机制考虑了节点间的冲突避免问题,但是不同父亲的节点间即表兄弟间仍存在干扰问题。例如,节点 A 和节点 B 在相互干扰的范围内,且具有不同的父节点。在发送周期内,如果节点 A 竞争到无线信道并发送数据,那么节点 B 和其父节点就会在发送周期结束后进入休眠周期。节点 B 只能休眠一段时间后才能再向其父节点发送数据,从而导致由于表兄弟间的干扰造成了节点 B 发送数据的睡眠延迟。为此,DMAC 协议引入了 MTS (More To Send) 帧机制。

MTS 帧只包含目的节点编号和 MTS 标志位,仅当 MTS 标志位为 1 时,表示发送 MTS 请求。节点有两种情况需要发送 MTS 请求:第一种情况是节点由于无线信道忙无法发送分组数据,在退避一段时间没有充足时间发送数据,同时也没有接收到父节点发送的 ACK 串扰信息,此时节点认为这是由于其他节点的干扰导致无法发送数据;第二种情况是节点接收到子节点发送的 MTS 请求,并沿树向其传递 MTS 请求。

DMAC 协议针对树形数据采集网络,依据节点在数据采集树上的深度,为节点分配交错的活动/休眠时间;通过引入自适应占空比机制避免了数据多跳传输中的睡眠延迟问题;通过引入数据预测机制和 MTS 机制有效降低了节点间的干扰而造成的传输延迟,支

持网络能量的高效利用。DMAC 协议是针对无线传感器网络特定的数据汇聚模式而设计的,比较适合边缘节点数据量小而中间节点数据量大的无线传感器网络,同时 DMAC 协议对节点间的时间同步要求也比较严格。

#### 4.2.4 混合型 MAC 协议

竞争性 MAC 协议能灵活适应网络规模、网络流量以及网络拓扑的变化,且容易实现,无须精确的时间同步。但是由于存在冲突重传、空间侦听和串扰等问题,因此能量效率不高。分配型 MAC 协议通过将子信道统一分配给需要通信的传感器节点,使信道之间无冲突、互不干扰,有效避免了冲突重传,提高了能量效率。但是分配型 MAC 协议通常需要严格的时间同步和固定的网络拓扑结构,而且延长了数据的传输延时。基于上述两种类型协议的优/缺点,研究人员提出了混合型 MAC 协议,该协议包含竞争型协议和分配型协议的设计要素,既能保持所组合协议的优点,又能避免各自的缺点,实现了性能的整体提升。本节选择比较典型的混合型协议——Z-MAC 协议、Funneling-MAC 协议及 IEEE 802.15.4 MAC 协议进行介绍。

##### 1. Z-MAC 协议

Z-MAC 协议是 Rhee 等在 2005 年提出的、结合 CSMA 和 TDMA 优点的混合型 MAC 协议。该协议的最主要特点是能够适应网络中的传输竞争强度,在传输竞争强度较低时,Z-MAC 协议使用 CSMA 信道访问方式,以提高无线信道的利用率和缩短传输延时;而在传输竞争较激烈时,Z-MAC 协议使用 TDMA 信道的分配方式,以获得较高的信道利用率,并以较小的代价减少冲突和串扰。同时,Z-MAC 对于时间同步的误差、时隙分配的失败及拓扑结构的动态变化都有比较好的鲁棒性。该协议的性能已经在 NS2 和 TinyOS 平台得到了验证,相比传统的 TDMA 协议,Z-MAC 协议具有更好的可靠性和容错能力,即使在最坏的情况下,该协议性能也接近 CSMA 协议的性能。

##### 1) 基本思想

Z-MAC 协议采用 CSMA 机制作为基本方法,在传输竞争加剧时,使用 TDMA 机制解决信道冲突问题。Z-MAC 协议主要通过引入时间帧概念来实现,每个时间帧又分为若干个时隙,在部署初始网络时,Z-MAC 协议对每个传感器节点进行时隙分配,使每个节点在时间帧中都拥有一个时隙。拥有该时隙的传感器节点称为该时隙的所有者,时隙的所有者在对应的时隙中拥有发送数据的最高优先级。与 TDMA 机制不同,Z-MAC 协议允许传感器节点在任意时隙开始传输。当传感器节点在某个时隙发送数据时,需要先进行载波侦听并且在信道空闲情况下发送数据。但是,时隙的所有者拥有高于其他节点接入信道的优先级,可以基于优先级 Z-MAC 协议实现 CSMA 与 TDMA 机制间的转换,即当时隙的所有者没有数据发送时,其他节点可以以 CSMA 机制的方式竞争该时隙。这时

相比其他节点,时隙所有者被赋予一个较小的时间窗口,所以能够优先抢占信道,通过这种机制来提高信道的利用效率。

## 2) 关键技术

在协议启动阶段,Z-MAC 协议将执行邻居发现和时隙分配、本地帧的信息交换和网络节点的时间同步三个步骤。在网络运行过程中,节点不会重复以上步骤,除非网络拓扑发生重大变化。

### (1) 邻居发现和时隙分配。

节点通过周期性发送 PING 消息实现对邻居节点的发现,PING 消息中包含传感器节点发现的所有一跳范围内的节点,通过节点间交换 PING 消息,每个传感器节点可以获得自己两跳范围内所有节点的信息,基于该信息进行时隙分配。Z-MAC 协议时隙分配采用 DRAND 算法,保证了两跳范围内节点不会分配相同的时隙,从而实现了每一个节点在向一跳邻居节点传输数据时,不会被其两跳范围内的节点所干扰。当有新的节点加入到网络时,DRAND 算法在不改变当前网络节点时隙调度的条件下,对新节点进行本地时隙分配。这种基于局部拓扑结构信息的时隙分配方法可以有效提高 Z-MAC 协议对网络拓扑的自适应性。

### (2) 本地帧的信息交换。

每个节点在时隙分配完成后,都需要确定时间帧大小以及进行时间帧的同步,这时所有节点采用相同长度的时间帧,同时采用全网同步,即时间帧具有同样的起始和结束时刻。不过这种方法设置的时间帧长度主要基于整个网络中时间帧的最大时隙数量,即所有节点根据最大时隙数量使用统一长度的时间帧,但这种方式无法适应新节点加入时局部时隙的改变。

为了解决上述问题,Z-MAC 协议设计了一种基于局部策略的调度方法,以用来确定节点维护的帧时隙大小以及每个时隙的状态。定义节点本地帧构成规则如下:当节点  $i$  执行 DRAND 算法后,根据节点本地的两跳邻居节点数  $F_i$ ,可获得节点  $i$  的本地帧长度  $2^\alpha$  必须满足下式

$$2^{\alpha-1} \leq F_i < 2^\alpha - 1 \quad (4.5)$$

当节点本地帧长度满足式 (4.5) 时,就保证了节点不会与任一两跳邻居节点发生冲突。当节点本地帧长度选定后,相邻节点间就可相互交换信息以完成整个操作。

### (3) 网络节点的时间同步。

当网络节点的时间完全不同步时,可以将 Z-MAC 协议转化为 CSMA 协议执行,因此在低冲突的情况下,Z-MAC 协议可以不需要时间同步,但是此时 Z-MAC 协议的性能与 CSMA 协议性能相仿。在高冲突情况下,Z-MAC 协议采用一种局部时间同步方法实现基于 TDMA 机制的数据传输。Z-MAC 实现局部同步是通过在发送的时间同步包中加入

发送节点的时间信息, 利用局部同步算法修正节点之间的时间偏移量。当一个节点接收到该时间同步包后, 会采用下面的计算公式来修正自身与发送时间同步包节点的时间偏差, 即

$$T_1 = (1 - \beta_i) \times T_2 + \beta_i \times T_3 \quad (4.6)$$

式中,  $T_1$  表示接收节点收到时间同步包后修正过的时间,  $T_2$  表示接收节点接收到时间同步包的时间,  $T_3$  表示发送时间同步包的节点时间,  $\beta_i$  表示发送节点时钟的偏移程度,  $\beta_i$  计算公式为

$$\beta_i = \min \{w_t, v \times t_{\min} \times w_t\} \quad (4.7)$$

式中,  $w_t$  表示时间同步包中的时间在计算接收节点新的时间时所占的最大权重,  $v$  表示节点接收或者发送时间同步包的速度,  $t_{\min}$  表示节点间进行同步的最小时间间隔。

Z-MAC 协议可以根据网络中的竞争情况来动态调整 MAC 协议所采用的机制, 自适应地在 CSMA 与 TDMA 机制间进行切换。在网络数据量较少的情况下, Z-MAC 协议采用 CSMA 机制; 在网络数据量较多的情况下, Z-MAC 协议采用 TDMA 机制。由于 Z-MAC 协议结合了竞争性 MAC 协议和分配性 MAC 协议的特点, 能很好地适应网络拓扑结构的变化, 同时能够提供比较均衡的网络性能。但是 DRAND 算法相对复杂, 这在一定程度限制了 Z-MAC 协议的应用。

## 2. Funneling-MAC 协议

Funneling-MAC 协议是 Ahn 等在 2006 年提出的另一种混合型协议, 它结合了 TDMA 协议和 CSMA/CA 协议的特点, 解决了无线传感器网络中特有的“漏斗现象”。漏斗现象是指由于无线传感器网络中的观测数据是以多对一的模式传输到汇聚节点的, 当观测数据越接近汇聚节点时, 汇聚节点附近的节点所需转发的数据量越多或流量强度越强, 从而产生汇聚节点附近的节点分组冲突、分组拥塞和分组丢失等现象。为了延长网络的生命周期, 必须尽可能地缓解这种漏斗现象。

### 1) 基本思想

Funneling-MAC 协议专门针对漏斗现象而设计, 是一种面向汇聚节点的局部化 MAC 协议, 其基本思想是: 在整个无线传感器网络范围内, 采用基于 CSMA 的协议。同时, 在漏斗区域, 采用 CSMA 和 TDMA 机制混合的信道访问方式, 通过 TDMA 机制增加靠近汇聚节点的传感器节点的信道访问机会。由于 Funneling-MAC 协议只是在靠近汇聚节点的漏斗区域采用 TDMA 机制, 而不是整个网络, 因此可以将 TDMA 机制更多的控制功能交给汇聚节点, 从而能够较好地解决 TDMA 机制的可扩展性问题。与其他混合型 MAC 协议相比, 如 B-MAC 协议和 Z-MAC 协议, Funneling-MAC 协议能够有效缓解漏斗现象、改善吞吐量, 防止分组丢失和提高能效, 因此具有更好的性能。

## 2) 关键技术

Funneling-MAC 协议采用的关键技术包括面向汇聚节点的调度策略和定时与成帧技术。

### (1) 面向汇聚节点的调度策略。

面向汇聚节点的调度策略的基本思想是：汇聚节点监测每条聚集路径上的输入流量，根据路径流量计算安排全部路径的 TDMA 传输时间策略，然后汇聚节点按照信标发射功率广播传输时间安排，从而实现漏斗区域各个节点的传输时间安排。

为了计算传输时间和制定安排策略，汇聚节点需要确定每条聚集路径的流量信息。Funneling-MAC 协议通过在分组头中预留了 3Byte 的路径信息域，其中 2Byte 用于汇聚路径的头节点 ID，1Byte 用于头节点到汇聚节点的跳数，向汇聚节点报告每跳聚集路径的输入信息，汇聚节点根据接收到的数据分组中携带的聚集路径头节点 ID 和转发跳数，构建聚集路径表，表中的条目包括每条聚集路径的头节点 ID、转发跳数和输入流量速率。

汇聚节点基于构建的聚集路径表进行时隙分配，分配的原则为：假设一条聚集路径的流量速率为  $k$ ，转发跳数为  $h$ ，那么给该条聚集路径分配的时隙个数  $num$  为

$$num = \lfloor k \rfloor \times h \quad (4.8)$$

如果聚集路径上的流量速率小于 1，则汇聚节点将给该条聚集路径分配  $h$  个时隙。

### (2) 定时与成帧技术。

Funneling-MAC 协议将在漏斗区域内的节点称为  $f$  节点， $f$  节点接收到汇聚节点的传输时间调度信息后，将其通信时间同步到 Funneling-MAC 协议的帧结构上，Funneling-MAC 协议的帧结构如图 4-17 所示。

将 TDMA 帧和 CSMA 帧综合在一起形成一个新的帧，称为超帧，两个信标之间重复几个超帧，一个传输时间调度分组通常跟随在信标之后， $f$  节点在其所得的 TDMA 时隙上发送自身的数据分组。超帧的持续时间固定不变，但是 TDMA 持续时间动态变化，如当流量载荷不断递增时，汇聚节点将在一个超帧中分配更多的时隙，一个超帧中 TDMA/CSMA 最大时间比率可达 80%。

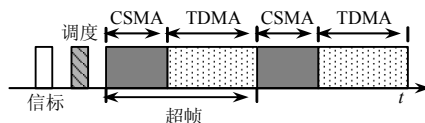


图 4-17 Funneling-MAC 协议的帧结构

Funneling-MAC 协议只是在靠近汇聚节点的漏斗区域内采用 TDMA 协议，而不是在整个网络区域，因此 Funneling-MAC 协议是一种局部化的 MAC 协议，其局部采用的 TDMA 协议主要由汇聚节点来完成控制调度功能，因此能够较好地解决无线传感器网络采用 TDMA 协议的可扩展性问题。同时能够有效缓解漏斗现象，改善吞吐量、分组丢失和能量效率等方面的性能。

## 3. IEEE 802.15.4 MAC 协议

IEEE 802.15.4 MAC 协议是 IEEE 802.15 工作组在 2006 年正式颁布的一种无线网络

标准,该标准定义了物理层和 MAC 层协议,主要为低速率、低功率和低成本的无线个人区域网(Wireless Personal Area Networks, WPAN)服务。ZigBee 联盟将 IEEE 802.15.4 MAC 协议作为 ZigBee 协议的物理层和介质访问控制层的标准,而 ZigBee 联盟负责网络层和应用层的开发。IEEE 802.15.4 协议支持两种网络拓扑结构:星形网络拓扑结构和点对点网络拓扑结构,其中星形网络拓扑适合家庭自动化、个人计算机的外设及个人健康护理等小范围的室内应用,而点对点网络拓扑结构提供了任意两个节点(如果在通信范围之内)之间直接相互通信,允许通过多跳路由的方式进行数据传输,该模式适合分布范围广泛的应用,如工业监测与控制 and 智能农业等。正因如此,IEEE 802.15.4 协议被广泛应用于无线传感器网络中。

### 1) 基本思想

IEEE 802.15.4 MAC 协议支持两种运行模式:信标触发模式和无信标触发模式,如图 4-18 所示。在信标触发模式下,IEEE 802.15.4 MAC 协议引入超帧概念,超帧由竞争周期和预留周期组成。在竞争周期内,传感器节点采用时隙 CSMA 机制竞争信道,获胜方可以在给定时隙内占用信道并进行数据传输,从而为传感器节点提供了一种灵活的接入方式;在预留周期内,簇头或者网络协调器掌握有高优先级节点的流量情况,同时基于节点的流量要求,为请求节点在预留周期内分配时隙,防止了其他节点对信道的竞争,从而提供了优先服务。由此可以看出,在信标触发模式下,IEEE 802.15.4 MAC 协议是一种基于 CSMA 机制和 TDMA 机制的混合型 MAC 协议。在无信标触发模式下,IEEE 802.15.4 MAC 协议较为简单,并不采用超帧结构,其节点全部是通过无时隙的 CSMA 机制竞争信道来发送数据的。

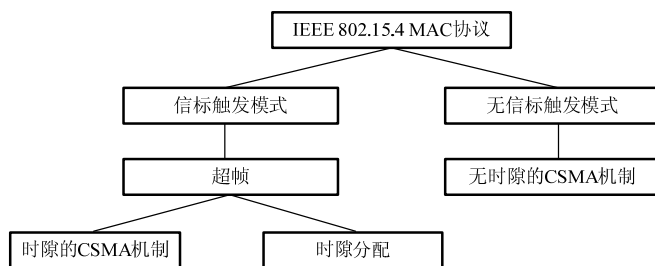


图 4-18 IEEE 802.15.4 MAC 协议运行模式

### 2) 关键技术

IEEE 802.15.4 MAC 协议采用的关键技术包括引入超帧的概念,通过超帧实现时间同步和节点间的通信;以及定义了三种数据传输方式,可以实现不同通信模式下数据传输。

#### (1) 超帧技术。

基于 IEEE 802.15.4 MAC 协议的网络,选用以超帧为周期组织网络节点间的通信,



每个超帧都以网络协调器发出信标帧开始, 且在整个信标帧中包含该超帧的持续时间, 以及对这段时间分配的信息。当网络中其他节点接收到超帧开始时的信标帧后, 就可以根据其中的内容安排自己的任务, 如进入休眠状态直至这个超帧结束。

IEEE 802.15.4 MAC 协议定义的超帧结构如图 4-19 所示。超帧将通信时间划分为活跃和非活跃两个时段, 首尾边界由其所发出的信标帧界定。在非活跃时段, 网络中的节点不相互通信, 而是进入休眠状态以节省能量。活跃时段被划分为 16 个等长的时隙, 由信标发送阶段、竞争访问阶段 (Contention Access Period, CAP) 和非竞争访问阶段 (Contention-free Period, CFP) 三个阶段组成。网络协调器对每个时隙的长度、竞争访问时段包含的时隙数等参数进行设定, 并通过超帧开始时发出的信标帧广播到整个网络。

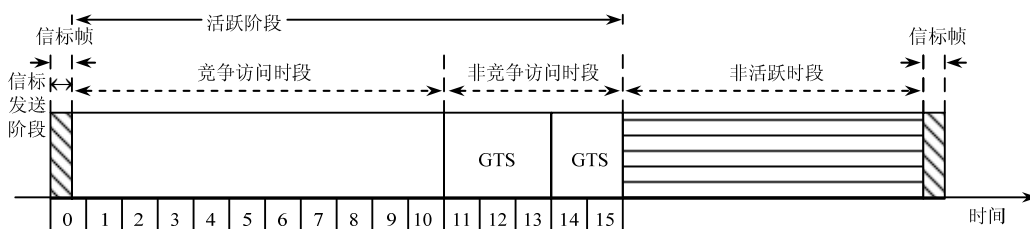


图 4-19 IEEE 802.15.4 超帧结构

在超帧的竞争访问阶段, 该网络中节点使用带时隙的 CSMA 访问机制, 并且任何通信都必须在竞争访问阶段结束前完成。在非竞争访问时段, 网络协调器根据上一个超帧期间网络中节点申请保证时隙 (Guaranteed Time Slots, GTS) 的情况, 将非竞争访问阶段划分成若干个 GTS, 每个 GTS 由若干个时隙组成, 时隙的数目在节点申请 GTS 时指定。如果申请成功, 该传感器节点就拥有该 GTS 内的时隙数目。如图 4-19 所示, 第一个 GTS 由时隙 11~13 构成, 第二个 GTS 由 14 和 15 时隙构成。每个 GTS 中的时隙都指定分配给了时隙申请节点, 因而不需要节点竞争信道。

## (2) 数据传输机制。

基于 IEEE 802.15.4 MAC 协议的网络定义了三种数据传输方式: 传感器节点发送数据给网络协调器、网络协调器发送数据给传感器节点和对等的传感器节点间的数据传输。其中星形网络拓扑结构网络中只存在前两种分组传输方式; 而在点对点网络拓扑结构中, 三种传输方式都存在。

基于 IEEE 802.15.4 MAC 协议的网络定义了信标触发模式和无信标触发模式两种通信模式。在信标触发模式下, 网络协调器定时广播信标帧, 由传感器节点通过信标帧进行时间同步, 而传感器节点间通信使用基于时隙的 CSMA 信道访问机制。在基于时隙的 CSMA 信道访问机制下, 每当传感器节点需要发送数据帧或者命令帧时, 它首先定位下一个时隙的边界, 然后等待一个随机数目的时隙。等待完毕后, 开始检测信道状态, 如果信道空闲, 传感器节点就在下一个时隙边界开始发送数据分组; 如果信道忙, 传感器

节点需要重新等待一个随机数目的时隙，再检测信道状态，重复这个过程直至有空闲信道出现。

在无信标触发模式下，网络协调器不发送信标帧，各个传感器节点使用非时隙的 CSMA 信道访问机制，即每当传感器节点需要发送数据或者发送 MAC 命令帧时，它首先等候一段随机长的时间，然后检测信道状态：如果信道空闲，就立刻发送数据；如果信道忙，传感器节点需要重复上一过程，直至发送数据成功。

IEEE 802.15.4 MAC 协议作为 ZigBee 协议的介质访问控制层标准，以其低成本、低能耗等优势，已经渗透到无线传感器网络的多种应用中。然而 IEEE 802.15.4 MAC 协议也存在其局限性，如并不适用于网络拓扑结构变化较快的场合，也不适用于需要较高数据传输速率的应用，并且该协议在能耗和时延均衡等方面还存在改进的地方。

## 4.3 网络协议

路由协议主要负责将数据分组从源节点可靠地转发到目的节点，它可实现两个方面的功能：一是寻找源节点与目的节点间的优化路径，二是将数据分组沿优化路径正确转发。由于无线传感器网络通常采用多跳路径传输数据，且具有能量受限，拓扑结构动态变化，以数据为中心，多对一传输，高数据冗余和应用相关等特征，导致传统无线网络的路由协议并不适用于无线传感器网络，因此必须设计适合无线传感器网络特征的高效路由协议，才能有效降低网络的能量消耗，减少数据的传输延迟和提高网络的吞吐率。可以说，路由协议的性能直接影响到整个网络性能，它是保证无线传感器网络可靠传输的关键技术之一。

### 4.3.1 路由协议特点及分类

传统无线网络，如 Ad Hoc、无线局域网（Wireless Local Area Networks, WLAN）等，其路由协议设计的首要目标是提供高质量和公平高效的网络带宽，同时降低节点间数据传输的延迟，避免产生通信拥塞和实现网络流量的均衡。然而在无线传感器网络中，传感器节点能量有限，且通常没有能量补充，因此在这里其路由协议设计的首要目标是降低节点的能量消耗和提高网络的能量利用效率，其次才考虑网络的传输性能和服务质量。因此，与传统网络的路由协议相比，无线传感器网络的路由协议具有以下六个特点。

（1）节能优先。在设计传统路由协议和选择路由最优路径时，很少考虑节点的能量消耗问题。但由于无线传感器网络中节点的能量十分有限，因此在设计路由协议时必须优先考虑节点的能量消耗以及网络中能量的均衡问题，以尽可能地延长整个网络的生命周期。

（2）可扩展性。无线传感器网络通常是由成百上千个传感器节点组成，由于不同监

测区域的原因形成了规模大小不一的网络；且因节点失效、新节点加入及节点移动等，使得网络拓扑结构动态变化频繁，这些都要求路由协议能定义比较好的可扩展性，以适应网络结构的变化。

(3) 鲁棒性。能量耗尽经常造成传感器节点失效，恶劣环境也会影响无线链路的通信质量，再加上低成本传感器节点自身可靠性等问题，导致以多跳方式进行数据传输的失效，因此无线传感器网络路由协议应具有一定的容错能力，以提高数据传输的可靠性。

(4) 以数据为中心。在传统无线网络中，路由协议通常是以地址作为节点标志来确定传输的路径，而在无线传感器网络中，用户通常只关心指定区域内所观测对象的数据，而不关心是哪个节点所观测到的数据，那么按照感知数据的需求，将多个传感器节点的数据汇聚到一个或少数几个节点处，这种以数据为中心的通信模式不同于传统无线网络的寻址过程。

(5) 多对一传输。在传统无线网络中，任意节点间都可能存在通信需求，因此路由协议需要在任意节点间建立传输路径。而无线传感器网络是面向信息感知的网络，其目的是将节点采集或监测的数据传输到汇聚节点做进一步处理，其数据传输通常是多对一模式，因此路由协议只需定义多个传感器节点到汇聚节点间的传输路径，而汇聚节点向传感器节点传输数据时则一般采用泛洪的方式。

(6) 应用相关。无线传感器网络通常是针对某种具体应用而设计部署的，不同的应用模式具有不同的数据通信方式，没有一个路由协议适合所有的应用。所以，在设计无线传感器网络路由协议时，应根据具体的应用需求设计与之适应的路由协议。

无线传感器网络路由协议的主要作用是在传感器节点和汇聚节点之间寻找和建立高效的数据传输路径，以提高网络能量的利用效率和实现网络能量的均衡，在此基础上提高网络传输吞吐量和服务质量。针对不同的无线传感器网络应用需求，研究人员已经从不同角度提出了多种路由协议，并进行了广泛的应用尝试，获得了大量的研究成果。但是由于无线传感器网络应用的相关性和多样性，基于不同场景所设计的路由协议对网络性能指标会有不同的侧重，因此为便于归纳总结和深入学习研究，有必要对现有的路由协议进行分类总结。

无线传感器网络路由协议的划分按照不同的分类标准，可以将已有的无线传感器网络路由协议分为如图 4-20 所示的不同类型。

### 1. 按照路由实现方法划分

按照路由实现方法划分，可以将路由协议划分为以数据为中心的路由协议、分层路由协议、地理位置信息路由协议和基于服务质量的路由协议四种类别。其中，以数据为中心的路由协议对感知的数据按照属性命名，对相同属性的数据在传输过程中进行融合操作；分层路由协议是将传感器节点按照特定规则划分为不同的簇，通过簇头节点搜集

簇内节点感知数据；地理位置信息路由协议是通过利用传感器节点自身的地理位置信息来实现和优化路由算法，提高路由效率的；基于服务质量的路由协议在支撑网络发现和维护的同时，力求满足网络的各类服务质量需求。

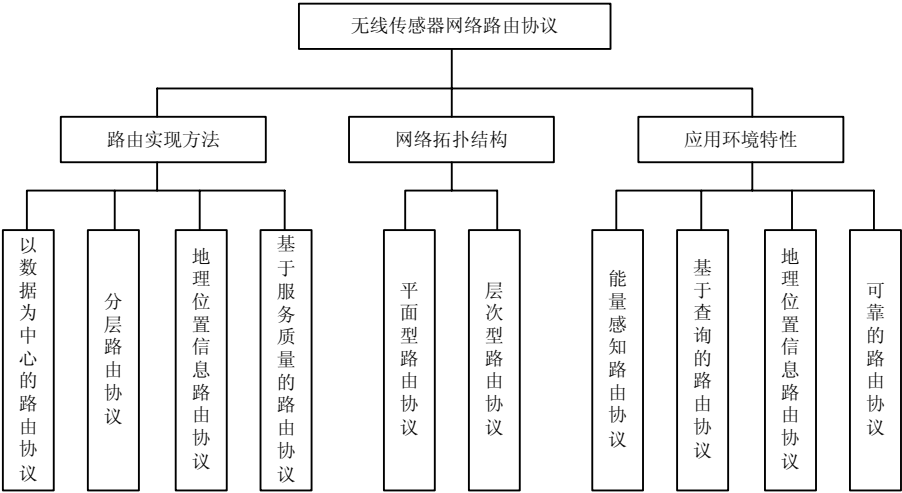


图 4-20 无线传感器网络路由协议的分类

2. 按照网络拓扑结构划分

按照传感器在网络拓扑结构中的地位等级和功能，可以将无线传感器网络路由协议划分为平面型路由协议和层次型路由协议两个类别。在平面型路由协议中，所有节点结构对等，具有相同的路由功能，平面型路由协议具有结构简单、容易维护，而且不会产生网络瓶颈，健壮性好等优点，但是平面型路由协议没有设置管理节点，无法对网络资源优化管理，数据需要多次通信转发，因此仅适用于小型网络结构。层次性路由协议则具有良好的扩展性，簇头节点可对数据进行融合与压缩以降低整个网路的数据通信流量，适用于大型网络，但维护簇结构需要额外的能量开销，且簇头作为路由的关键节点容易因失效而导致传输路径断开，无法传输数据。

3. 按照应用环境特性划分

按照应用环境特性，可以将无线传感器网络路由协议划分为能量感知路由协议、基于查询的路由协议、地理位置信息路由协议和可靠的路由协议。其中，能量感知路由协议是以应用环境需求中高效利用能量为出发点，寻找最优能量消耗路径；基于查询的路由协议是基于环境检测、战场评估等应用而提出，针对汇聚节点周期性查询传感器节点的数据而设计的；地理位置信息路由协议是针对目标跟踪应用中，利用节点的位置信息作为路由选择的依据，来优化传输路径；可靠的路由协议是基于对服务质量要求较高的应用而设计的，它主要考虑数据通信的可靠性、实时性和安全性等。

尽管无线传感器网络路由协议的划分方法比较多,但是总体来看,对路由协议较为主流的分类方法是按照路由实现方法划分的,这也比较符合路由算法实现的实质。因此,本书采用依据路由实现方法的分类方式进行分类,从以数据为中心的路由协议、分层路由协议、地理位置信息路由协议和基于服务质量的路由协议四种类型入手,介绍目前比较有代表性的路由协议,如图4-21所示,阐述各种路由协议的基本思想以及采用的关键技术,在此基础上对路由协议的性能归纳总结。

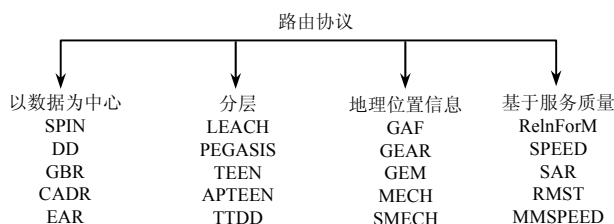


图 4-21 路由协议概览

### 4.3.2 以数据为中心的路由协议

无线传感器网络是一种以数据为中心的网络,以数据为中心的路由协议是专门针对无线传感器网络而设计的。在此类路由协议中,汇聚节点向感兴趣区域发送查询信息,感兴趣区域内的传感器节点将监测到的数据传输给汇聚节点,在数据传输过程中,路径上的传感器节点可以根据情况对来自多个传感器节点的数据进行数据融合处理,以有效减少网络中所传输的数据量,降低网络的能量消耗。其中,典型的以数据为中心的路由协议有:基于协商(Sensor Protocol for Information via Negotiation, SPIN)的路由协议、定向扩散(Directed Diffusion, DD)路由协议、基于梯度(Gradient-Based Routing, GBR)的协议、CADR 路由协议(Constrained Anisotropic Diffusion Routing)和 EAR(Energy Aware Routing)协议等,本节将重点介绍 SPIN 和 DD 两种比较有影响的路由协议。

#### 1. SPIN 路由协议

SPIN 路由协议是 Heinzelman 等在 1999 年提出的一种自适应路由协议,主要解决 Flooding 协议存在的问题,是最早一类无线传感器网络路由协议的典型代表。该协议基于协商机制,并且具有能量自适应功能,是第一个以数据为中心的路由协议。与 Flooding 和 Gossiping 路由协议相比,该协议能够在数据传输过程中对数据进行融合处理,有效地降低网络通信负载和网络的能量消耗。其基本思想被许多以数据中心的无线传感器网络路由协议所借鉴,因此有必要对其进行详细阐述。

##### 1) 基本思想

在无线传感器网络中,相邻传感器节点所感知的数据通常具有很强的相似性,如果

不进行处理即传输,将会导致数据的冗余问题,造成网络通信能耗急剧增加。为了解决该问题,SPIN 路由协议提出了一种协商机制,即节点通过协商只传输相邻节点所没有的数据以减少冗余数据,从而减少能量消耗。该协商机制实现的基本原理是:任意节点在发送数据前,首先需要发送一个元数据(Meta-data),元数据描述了传感器节点所采集的数据属性的数据,邻居接收节点收到元数据后,根据自己是否已有元数据中所描述的数据信息,来决定是否需要发送。除了引入协商机制,SPIN 路由协议还引入基于门限的能量自适应机制,即节点在发送数据前,首先检测自身的剩余能量,如果能量充足,则启动协商过程参与数据传输;否则,减少参与数据的传输。

## 2) 关键技术

SPIN 路由协议实现的关键是协商机制,它通过定义三种类型的消息来实现以数据为中心的自适应通信方式,解决了 Flooding 路由协议的内爆和无线传感器网络特有的重叠问题。

其中,内爆问题是 Flooding 路由协议的固有问题,这是由于 Flooding 路由协议规定:每个节点接收到其他节点的数据,都以广播的形式发送给其邻居节点。如此循环下去,就会导致目的节点多次接收到同一数据,即数据的内爆,如图 4-22 所示。数据的内爆将会给传感器节点造成极大的能量浪费。

重叠问题是无线传感器网络特有的,如图 4-23 所示,由于传感器节点 A 和 B 具有重叠的感知区域,因此当重叠区域的事件被 A 和 B 两个节点探测到时,同一事件将被传给它们共同的邻居节点,从而造成了能量浪费。

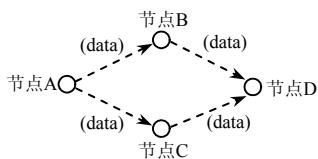


图 4-22 Flooding 路由协议中的内爆问题

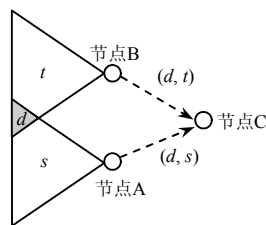


图 4-23 路由协议中的重叠问题

为了解决内爆和重叠问题,SPIN 路由协议定义了 ADV 消息、REQ 消息和 DATA 消息三种类型的消息。其中 ADV 消息为广播消息,当传感器节点有数据需要共享时,可以用 ADV 消息通知其邻居节点;REQ 消息用于请求发送数据,即当传感器节点接收到 ADV 消息后,希望得到接收数据时,发送 REQ 消息请求发送 DATA 消息;当源节点在收到 REQ 消息后,才将 DATA 消息发送给请求该数据的节点。

SPIN 路由协议的路由建立与数据传输过程如图 4-24 所示。当传感器节点 E 感知到新的数据时,为了避免盲目传输,首先向邻居节点广播包含元数据的 ADV 消息;传感器节点 D 回送一个 REQ 消息表示对此数据感兴趣;然后传感器节点 E 将发送 DATA 消息给

节点 D；节点 D 接收到数据后，继续向其邻居节点 A、B、C 发送 ADV 消息进行转发；如果传感器节点 A 存有 ADV 消息里的内容，则节点 A 就不会响应节点 D 的 ADV 消息，因此只有节点 B 和 C 发送了 REQ 消息；节点 D 接收到 REQ 时，只向感兴趣的节点的 B 和 C 发送 DATA 消息。

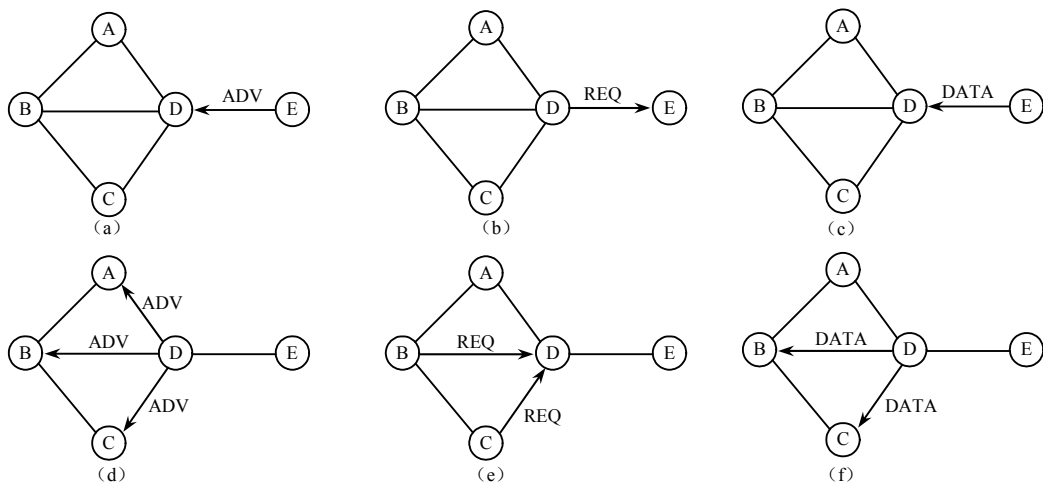


图 4-24 SPIN 路由协议的路由建立和数据传输过程

SPIN 路由协议要求每个节点只需要知道其一跳范围内相邻节点的信息，因此其实现比较简单，能够有效降低网络能量消耗。其缺点是，当产生或收到数据的节点的所有邻居节点都不需要该数据时，将导致数据不能继续转发，以致监测数据无法传输到目的节点。

## 2. DD 路由协议

DD 路由协议是 Intanagonwiwat 等在 2000 年提出的一种基于查询的路由选择方法，是以数据为中心的路由选择算法发展过程中的一个里程碑。该协议采用多路径策略，具有较好的健壮性；使用了数据聚合方式可有效减少数据通信量；汇聚节点可以根据实际情况采取不同方式有效利用能量；同时以查询为驱动按需建立路由，不需要保存全网信息，具有比较好的可扩展性，被许多研究者当做路由选择算法中的典范进行分析。

### 1) 基本思想

与已有的路由协议有着截然不同的实现机制，DD 路由协议实现的基本思想是：首先使用基于属性的命名机制来描述数据，当汇聚节点对某一类型数据感兴趣时，就会通过泛洪方式周期性地广播一种被称为兴趣的消息，该消息内包含该类型数据的特征，告诉网络中的其他节点需要搜集何种信息；然后兴趣消息在网络中扩散，同时建立从源节点到汇聚节点的路由路径，该路由路径被称为梯度；通过兴趣消息扩散阶段建立的路径，源节点将数据消息传送到汇聚节点；最后汇聚节点会利用本地化规则选择一条最优的路径进行强化，让后续的数据沿着这条路径进行传输。

## 2) 关键技术

DD 路由协议的实现过程可以分为兴趣消息扩散阶段、梯度建立阶段和路径增强阶段三个关键阶段, 下面详细介绍每一个阶段的实现过程。

### (1) 兴趣消息扩散阶段。

DD 路由协议的兴趣消息扩散阶段的实现过程如图 4-25 所示。首先, 定义兴趣消息内容包含任务类型、目标区域、数据传输率和时间戳等参数, 然后汇聚节点周期性地向邻居节点广播兴趣消息, 使兴趣消息在整个网络中泛洪传输; 接收到兴趣消息的传感器节点就把该信息保存在自身的兴趣缓存中, 并记录时间戳、梯度和持续时间等字段值。其中, 时间戳字段表明收到兴趣消息的时刻, 梯度字段表明与该兴趣消息有联系的邻居节点所需数据传输速率和数据发送方向, 持续时间字段表明兴趣消息的生命周期, 以及节点是否已收到兴趣消息的地理区域和时间间隔等。

当传感器节点接收到一个兴趣消息时, 按照三种原则进行处理: 第一种是在兴趣缓存中检查是否存在相同的兴趣表项, 如果没有, 就根据接收内容创建一个新的兴趣表项; 第二种是如果该节点存储有相同的兴趣表项, 但是没有兴趣消息来源的梯度信息, 就增加一个梯度字段, 并更新时间字段和持续时间字段; 第三种是如果该节点有相同的兴趣表项和梯度信息, 就只需要对时间字段和持续时间字段进行更新。

### (2) 梯度建立阶段。

DD 路由协议的梯度建立阶段实现过程如图 4-26 所示。当传感器节点采集到与兴趣匹配的数据时, 该节点就成为源节点, 并按照如下规则转发数据: 按照对应兴趣表项中各个梯度域的邻居节点信息, 进行数据的转发。由于在兴趣扩散阶段采用广播方式, 因此每一个节点可能从多个邻居节点接收到兴趣消息, 从而导致源节点兴趣表项中存在多个梯度域, 这就使得源节点需要向梯度域上的多个邻居节点转发数据。

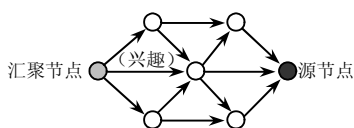


图 4-25 DD 路由协议的兴趣消息扩散阶段

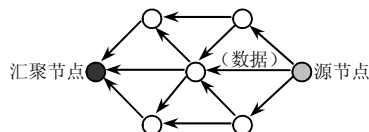


图 4-26 DD 路由协议的梯度建立阶段

中间节点按照如下规则转发源节点的数据: 首先查找兴趣消息列表, 是否存在相匹配的兴趣表项, 如果不存在, 该中间节点就丢弃该数据; 否则, 查找数据缓冲区是否接收过这个数据, 如果没有, 就把该数据加到数据缓冲区中, 查兴趣表项的梯度域进行数据转发; 否则丢弃该数据。

梯度可以根据应用按需设计, 即可以根据传输速率、链路质量、能量消耗、跳数或服务质量等情况, 一条路径的梯度大小反映了该条路径是否适合向汇聚节点传输数据。数据缓冲区的主要作用是防止数据传输的“环路”现象。



### (3) 路径增强阶段。

DD 路由协议的路径增强阶段实现过程如图 4-27 所示。为了防止汇聚节点接收到来自多条路径上的数据，汇聚节点需要通过路径增强阶段来确定一条合适路径，进行数据转发。路径增强的规则可以根据应用需求选择，如根据链路质量的好坏，根据最小延迟规则或根据路径能量消耗等进行选择。

运用路径增强的方法，可以在源节点和汇聚节点之间建立一条静态路径，同时路径增强方法也能够使数据传输路径适应无线传感器网络的动态变化。

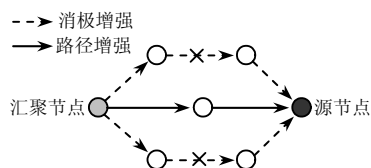


图 4-27 DD 路由协议的路径增强阶段

DD 路由协议是一种以数据为中心的经典查询路由协议，该协议的显著特点是通过汇聚节点发起兴趣查询消息，并通过泛洪的方法建立源节点与汇聚节点之间的传输路径。DD 路由协议需要通过汇聚节点完成对相关节点的查询，因梯度建立开销很大，所以并不适合大规模的网络。DD 路由协议相比较其他协议而言，适合具有大量查询而只有少量监测事件的应用场景，如军事后勤装备的监控系统。

### 4.3.3 分层路由协议

分层路由协议是将网络中的传感器节点分成多个簇，每个簇由簇头和若干个成员节点组成。簇头负责收集簇内成员节点监测的数据，并对数据进行必要的融合处理，通过与其他簇头共同形成的路径将数据传送到目的节点。成员节点只需要与簇头节点通信，因此可以在没有任务的情况下进行休眠，以降低传感器节点的能耗。相比平面结构路由协议，分层路由协议利用簇内节点的睡眠调度有效地降低了节点能耗和信道竞争率，实现了高效的数据融合，提高了网络的可扩展性和对网络的可管理性，正是因为这些优点，分层路由协议被广泛研究。其中典型的分层路由协议包括 LEACH（Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy）路由协议、PEGASIS（Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems）路由协议、TEEN（Threshold sensitive Energy Efficient sensor Networks protocol）路由协议、APTEEN（Adaptive Periodic TEEN）和 TTDD（Two-Tier Data Dissemination）路由协议等，本节将重点介绍 LEACH 路由协议和 PEGASIS 路由协议两种比较有影响的路由协议。

#### 1. LEACH 路由协议

LEACH 路由协议是由 Heinzelman 等提出的低功耗自适应能量有效的分簇路由协议，也是最早提出的分层路由协议。该协议基于网络中传感器节点密度大和同构设计，具有功率可控和数据融合功能，可降低簇内传感器节点的能量消耗，延长其生命周期，同时通过簇头的动态选举实现均衡网络能量的消耗。

### 1) 基本思想

LEACH 路由协议是通过周期性地随机选择簇头节点, 将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点上。当簇头节点选定后, 其他非簇头节点以就近原则加入相应的簇内, 簇内成员节点负责采集周围环境信息, 并将采集的信息传送给簇头节点, 簇头节点将本簇内接收的所有信息进行融合处理, 再发送给其他的汇聚节点。簇内通信采用 TDMA 方式, 其内不同节点占用不同的时隙, 节点只在分配的时隙内发送数据, 其余时隙转入休眠模式。簇间采用 TDMA 方式进行通信以防止其他簇内节点的干扰。

### 2) 关键技术

LEACH 路由协议的执行过程按“轮”周期地进行, 每轮由簇头建立阶段和数据传输阶段两个阶段构成。

#### (1) 簇头建立阶段。

簇头建立阶段的核心是对簇头节点的选取, LEACH 路由协议采用的簇头选取机制为: 首先, 每个传感器节点在  $0 \sim 1$  之间选择一个随机数, 若此随机数小于本轮的一个门限值, 则该传感器节点成为簇头节点。传感器节点  $n$  的门限值计算公式为

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times [r \times \text{mod}(1/P)]} & n \in G \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4.9)$$

式中,  $P$  为事先设定的簇头节点的比例, 根据文献资料,  $P$  的取值通常大于 5%;  $r$  为当前的轮数;  $G$  为在最近的  $r$  轮中没有被选为簇头的节点的集合。

簇头被选定后, 簇头节点将使用相同的发射功率主动向所有传感器节点广播自己成为簇头的消息, 周围附近的非簇头节点根据接收信号强度的大小, 选择合适的簇加入, 并告知相应的簇头节点, 完成簇的建立。最后, 簇头节点采用 TDMA 方式为簇内成员节点分配向其传输数据的时隙。

#### (2) 数据传输阶段。

数据传输阶段, 每个传感器节点在分配的时隙内, 使用最小能量发送数据给簇头节点。在其不发送数据的时隙内, 节点可进入休眠状态以降低能量消耗。当簇头节点接收到所有节点的数据后, 进行必要的压缩和数据融合, 以减少发送数据的数量和降低数据通信的能耗。

LEACH 路由协议通过簇内成员节点休眠机制和簇头数据融合机制降低了节点的通信能耗, 通过簇头的动态选举实现了网络能量消耗的均衡。然而该协议仍存在问题, 如不同轮中产生的簇头数量可能相差很大, 并且分布不均匀; 簇头节点与汇聚节点之间采用直接通信方式进行数据传输, 造成了较大的能量消耗, 从而影响网络的生存寿命。

## 2. PEGASIS 路由协议

PEGASIS 路由协议是在 LEACH 路由协议的基础上提出的一种分层路由协议，它借鉴了 LEACH 路由协议的动态选举簇头的思想，但是整个网络所有节点只形成一个簇，即仅有一个簇头或链首，基于该链首节点，其他传感器节点通过贪婪算法选择最近的邻居节点形成链，将数据汇聚到链首节点。

### 1) 基本思想

PEGASIS 路由协议的基本思想是在每一轮通信之前，选择一个传感器节点作为链首节点，然后从离汇聚节点最远的传感器节点开始构建链，即节点发送检测信息和回送检测应答来确定自己与相邻节点之间的距离，并通过贪婪算法，将距离自己最近的节点作为自己的数据传输的下一跳节点，已经在链上的节点不再继续参与后续的过程。当链中的一个节点失效时，必须重新构建链。

### 2) 关键技术

PEGASIS 路由协议实现的核心是基于链的数据融合传输机制和令牌控制机制。

#### (1) 基于链的数据融合传输机制。

PEGASIS 路由协议定义数据传输从链的两端开始，在传输路径上的节点通过数据融合处理来降低数据传输量，其实现原理如图 4-28 所示。图中节点 C 被选为链首节点，链首节点将信息向周围节点广播，收到链首节点信息的远端节点 A 将数据传送给邻居节点 B，节点 B 接收节点 A 的数据并与自身数据进行融合处理，将融合结果发送给链首节点 C。同样，节点 E 将数据发送给节点 D，然后节点 D 将节点 E 与自己的数据融合后传送给链首节点 C。链首节点 C 再将收集到的数据进行融合处理后传送给汇聚节点。

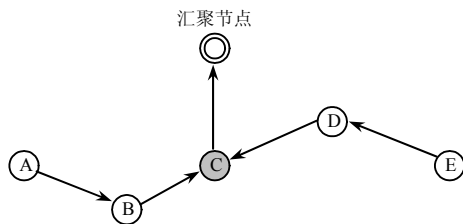


图 4-28 基于链的数据融合传输机制

#### (2) 令牌控制机制。

PEGASIS 路由协议定义数据的传输采用令牌控制方式，每轮开始时由簇头将令牌传送到两端节点，由端节点开始，依次由各节点传送数据和令牌，只有接收到令牌的节点才能向下一个邻居节点发送数据，数据传输结束后，令牌回到链首节点。相比与时隙调度方式，令牌控制机制不需要为每个节点分配时隙，也不需要各节点保持严格的时间同步。

相比于 LEACH 路由协议，PEGASIS 路由协议有效避免了频繁簇头选举所带来的通信开销，同时链式数据传输过程中对数据进行的有效融合处理，也极大降低了节点的通信能耗。但是 PEGASIS 路由协议由于采用了单簇结构，对簇头的可靠性依赖比较严重；链中任意节点的失效都会导致链的重新构建，导致额外的能量开销；同时如果因为链过长，数据的传输时延将会增大，并不能满足实时应用需求。

### 4.3.4 地理位置信息路由协议

在无线传感器网络众多应用中，都要求传感器节点具备自身位置信息，这样它采集的数据才会有意义。地理位置信息路由协议是以传感器节点已经知道自身的地理位置信息为假设基础，并结合一定的优化策略进行寻址和数据转发的。通过利用传感器节点的地理位置信息，可以极大优化路径的选择，有效降低路由协议的开销。其中，典型的地理位置信息路由协议有：GAF（Geographical Adaptive Fidelity）路由协议、GEAR（Geographical and Energy Aware Routing）路由协议、GEM（Graph Embedding）路由协议、MECH（Minimum Energy Communication Networks）路由协议和 SMECH（Small MECH）等，本节将重点介绍 GAF 和 GEAR 两种比较有影响的地理位置信息路由协议。

#### 1. GAF 路由协议

GAF 路由协议是 Xu 等人提出的基于有限能量和节点位置信息的路由协议，该协议最初是为移动 Ad hoc 网络而设计的，但其同样也可以应用于无线传感器网络中，因为它为虚拟网格思想提供了一种新的分簇思路。GAF 路由协议以节点地理位置为依据，进行路由路径选择的优化，同时通过关闭一些不需要的节点来节省能量，有效降低了网络的能量消耗。

##### 1) 基本思想

GAF 路由协议以传感器节点实际地理位置为依据来划分虚拟网络，如图 4-29 所示，它将监测区域划分成三个虚拟网格，各传感器节点按照自身位置信息划入相应虚拟网格，在每个虚拟网格中的节点定期选举产生一个节点充当簇头，承担该虚拟网格区域的事件监测及数据转发任务，并让簇头节点保持值班侦听活动状态，网格内的其他节点转入休眠状态。处于休眠状态的节点周期性的苏醒，与处于激活状态的节点交换角色以平衡能量能耗。

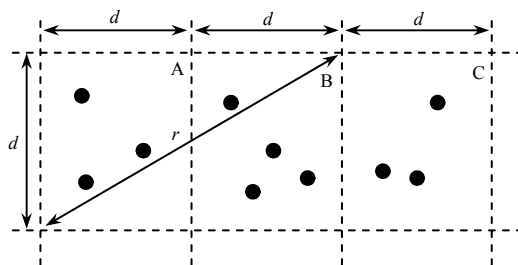


图 4-29 GAF 虚拟网格划分

##### 2) 关键技术

GAF 路由协议的关键技术包括虚拟网格的划分、分布式协商机制和对节点移动的自适应。

### (1) 虚拟网络的划分。

虚拟网络的划分主要根据节点的位置信息和通信半径，划分的虚拟网络必须满足相邻网格间任意两个节点可以直接通信的要求。假设所有节点的通信半径为  $r$ ，网格边长为  $d$ ，为保证相邻任意两个单元格内的任意两个传感器节点能够直接通信，则虚拟网络边长与通信半径之间需要如下关系式

$$d^2 + (2d)^2 \leq r^2 \Rightarrow d \leq \frac{r}{\sqrt{5}} \quad (4.10)$$

从分组转发及数据监测的角度来看，属于同一虚拟网络的传感器节点可以认为是等价的，因此每个网格只需选出一个节点作为簇头保持活动状态即可。

### (2) 分布式协商机制。

GAF 路由协议中，每个传感器节点都可以处于休眠、发现和活动三种状态，节点周期性地进入休眠和活动状态。如图 4-30 所示。

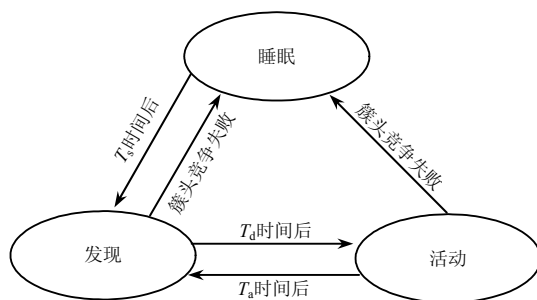


图 4-30 节点状态转移图

在网络初始化时期，所有节点都处于发现状态，并设置自身定时器为随机时间  $T_d$ ，一旦定时器超时，节点即广播 HELLO 消息声明其为簇头节点，并进入活动状态，竞选失败则进入休眠状态，节点以完全随机的方式公平竞选簇头。处于休眠状态的节点设置定时器的时间为  $T_s$ ，并在定时器超时后重新回到发现状态。簇头节点根据自身能量设置定时器的时间为  $T_a$ ，并定时广播 HELLO 消息抑制其他节点成为簇头，在设定的  $T_a$  超时后节点回到发现状态。

### (3) 节点移动的自适应。

GAF 路由协议通过调节网络中处于活动状态的传感器节点数，使得参与路由的节点数维持在一个相对稳定的水平，理想情况是：在任何时间，每个虚拟网络中都只有一个传感器节点处于活动状态。但由于节点的移动性，处于活动状态的节点可以会移出其所在网络。这样会使其先前所在的网络中没有处于活动状态的节点，从而降低了数据传输的可靠性，当节点移动性较强时，会带来较大的丢包率。

GAF 路由协议为解决这一问题，利用了 HELLO 消息中的 sTime 参数，该参数表示

节点停留在当前网格中的时间。通过这一信息,就可以调节传感器节点的休眠时间,减少由于传感器节点移动对路由性能带来的影响。

## 2. GEAR 路由协议

GEAR 路由协议是 Yu 等人提出的主要借鉴 DD 路由协议思想的节点位置信息路由协议,该协议主要针对数据查询中汇聚节点需要将查询命令发送给监测区域内的所有节点的问题,基于节点的地理位置信息,以节点能量消耗为优化目标,建立从汇聚节点到目标节点之间的路径。

### 1) 基本思想

GEAR 路由协议定义事件区域的位置信息已知,且节点都知道自己的位置信息和剩余能量信息,而所有邻居节点的位置信息和剩余能量信息可通过一个简单的 HELLO 消息交换机制来确定。GEAR 路由协议基于节点地理位置信息和节点剩余能量信息,在感兴趣区域建立与汇聚节点的优化路径,将数据传输到特定区域内的节点,而不是将数据发往整个网络。

### 2) 关键技术

在 GEAR 路由协议应用中,传输查询消息包括到查询消息目标区域建立路径及查询消息在目标区域的传播两个阶段。

#### (1) 查询消息到目标区域建立路径。

GEAR 路由协议采用估计代价和实际代价两种代价表示路径代价。估计代价综合了节点剩余能量和到目标区域中目标节点的归一化距离,中间节点使用估计代价决定下一跳节点。实际代价是对估计代价的一种提炼,包括考虑路由空洞问题。路由空洞现象是指对一个节点来说,不存在比自身离目标区域更近的邻居节点。通过估计代价和实际代价,可以有效解决路由空洞问题。具体构建过程如下所述。

节点  $N$  准备转发消息分组  $P$ ,其目标节点为  $T$ ,节点  $N$  通过选择邻节点中实际代价  $h(N,T)$  最小的节点作为下一跳节点。如果节点  $N$  不存在实际代价  $h(N,T)$ ,则使用估计代价  $c(N,T)$  作为默认值, $c(N,T)$  的定义为

$$c(N,T) = \alpha d(N,R) + (1-\alpha)e(N) \quad (4.11)$$

式中, $\alpha$  为可调权重, $d(N,R)$  为节点  $N$  到目标节点  $T$  的距离, $e(N)$  为节点  $N$  消耗的能量, $d(N,R)$  和  $e(N)$  都是归一化值。当节点选择了下一跳邻居节点  $N_{\min}$  后,将自己的实际代价  $h(N,T)$  修改为  $h(N_{\min},T) + c(N,N_{\min})$ 。

#### (2) 查询消息在目标区域的传播。

当查询消息到达目标区域后,可以通过泛洪方式在目标区域进行传播,但是如果目标区域节点数比较多,采用泛洪方式的开销将会比较大,这时 GEAR 路由协议定义了一种迭代地理转发策略,即在目标区域内,先接收到查询命令的节点将目标区域划分为若

干个区域,并向所有子区域的中心位置转发查询命令。在每个子区域中,最靠近区域中心的节点接收查询命令,并将自己所在的子区域再划分为若干个子区域,并向各个子区域中心转发查询命令。该查询消息传播过程是一个迭代过程,当节点发现自己是某个子区域内唯一的节点,或者某个子区域没有节点存在时,停止向这个子区域发送查询命令。当所有子区域转发过程全部结束时,就停止递归转发过程,整个迭代过程终止。

泛洪机制和迭代地理转发机制各有优/缺点,当目标区域内节点较多时,迭代地理转发机制的消息发送次数少;而当目标区域内节点较少时使用洪泛策略的效率较高。一般情况下,当查询消息到达目标区域内的第一个节点时,如果该节点的邻居数量大于预设的阈值,则使用迭代地理转发机制,否则采用泛洪策略来转发查询消息。

### 4.3.5 基于服务质量的路由协议

无线传感器网络的许多应用对服务质量有较高的要求,如安防系统中要求无线传感器网络具有较高的可靠性,战场监测网络要求无线传感器网络具有较强的实时性,无线多媒体网络要求具有较好的通信带宽保证等。然而在无线传感器网络中,链路的稳定性很难保证,如通信质量较低,拓扑结构变化频繁,因此要实现服务质量保证,需要基于应用特点设计可靠的路由协议。目前,可靠路由协议主要从两个方面考虑:一是利用节点的冗余性提供多条路由路径以保证通信的可靠性;二是建立对传输可靠性的评估机制,从而保证每跳传输的可靠性。其中,典型的基于服务质量的路由协议有:可靠多路径信息转发(Reliable Information Forwarding using Multiple Paths, ReInForM)路由协议、SPEED路由协议、SAR(Sequential Assignment Routing)路由协议、RMST(Reliable Data Transport in Sensor Networks)路由协议和MMSPEED(Multi-path Multi-SPEED)路由协议等,本节将重点介绍 ReInForM 和 SPEED 两种比较有影响的基于服务质量的路由协议。

#### 1. ReInForM 路由协议

ReInForM路由协议是由Deb等人提出的通过在多条路径上发送数据包的多个复制内容来提高数据包传输可靠性的路由协议,是一种可以应用在网络通信恶劣环境下的高可靠性路由协议。在信道错误率很高的情况下,该路由协议仍可以保证数据分组有较高的到达概率。

##### 1) 基本思路

首先,数据源节点根据传输的可靠性需求、信道质量以及传感器节点到汇聚节点的跳数,确定需要的传输路径数目;然后,在邻居节点中选择若干节点作为下一跳转发节点,并给每个节点按照一定的比例分配路径数目;最后,数据源节点将分配的路径数作为数据包头中的一个字段发给邻居节点,邻居节点在接收到数据源节点的数据后,将自己视做数据源节点,重复上述数据源节点的选择过程。通过多路径选择可有效保证网络

数据传输的可靠性要求。

## 2) 关键技术

ReInForM 路由协议实现的关键技术包括传输路径数计算、下一跳节点的选择与路径分配、邻居节点重新计算路径。

### (1) 传输路径数计算。

在 ReInForM 路由协议中, 通过定义系统的可靠性要求  $r_s$  和信道差错率  $e_s$  来计算经过  $h_s$  跳后数据包到达汇聚节点的成功概率  $p_s$  为

$$p_s = (1 - e_s)^{h_s} \quad (4.12)$$

那么数据分组经过  $N$  跳路径后均不能到达汇聚节点的概率  $P$  为

$$P = [1 - (1 - e_s)^{h_s}]^N \quad (4.13)$$

利用系统的可靠性要求  $r_s$  可以计算出源节点需要的传输路径数  $N$  为

$$N(r_s, e_s, h_s) = \frac{\log(1 - r_s)}{\log(1 - (1 - e_s)^{h_s})} \quad (4.14)$$

### (2) 下一跳节点选择与路径分配。

根据源节点到汇聚节点的跳数不同, 可以把预期相邻的节点分为三类: 与自身到汇聚节点跳数相同的节点, 用  $C_0$  表示; 比自身到汇聚节点少一跳的节点, 用  $C_-$  表示; 比自身到汇聚节点多一跳的节点, 用  $C_+$  表示。源节点首先在  $C_-$  中选择一个节点作为默认的下一跳节点, 并且设定其转发概率为 1。因此得到源节点到默认下一跳节点的数据发送成功概率为  $(1 - e_s)$ , 如果该成功概率大于按照式 (4.14) 计算得到的路径数, 则满足系统可靠性要求。否则, 需要额外转发节点。额外路径优先从  $C_-$  中选取节点, 只有超过  $C_-$  中的节点数量, 才从  $C_0$  中选择转发的节点, 如果此时转发的节点数量仍不能满足系统可靠性要求, 则从  $C_+$  中选择转发节点。

### (3) 邻居节点重新计算路径。

在源节点发送的数据分组头部中添加  $e_s$ 、 $h_s$  等参数, 使邻居节点收到分组数据后, 按照与路径数相同的概率决定是否转发分组。如果确定转发该分组, 则节点将自己作为源节点, 并按式 (4.14) 重复上述步骤。

应用 ReInForM 路由协议, 能够有效保证网络数据传输的可靠性要求, 但是在选取节点转发数据时并没有考虑到节点能耗均衡, 仅追求单一的可靠性目标, 忽略了节点能量优化, 均衡网络能量负载和延长网络生命周期等问题。

## 2. SPEED 路由协议

SPEED 协议是 Tian 等人提出的一个实时路由协议, 在一定程度上保证了端到端的传输速率, 实现了网络拥塞控制及网络负载的均衡, 解决了汇聚节点对监测区域内目标节



点采集数据实时传输性的应用需求。

### 1) 基本思想

为了保证网络中数据分组的传输速率, SPEED 路由协议首先要求通过交换节点间传输延迟信息, 以得到网络的负载情况, 并判断网络是否发生拥塞; 然后, 节点利用局部地理信息和传输速率信息做出路由选择决策, 当 SNGF (Stateless Nondeterministic Geographic Forwarding) 算法找不到满足传输速率的下一跳节点时, 则通过邻居反馈机制保证网络传输速率维持在一个全局定义的传输速率之上; 最后, 通过反向压力路由变更机制来避免拥塞和路由空洞, 使节点重新选择合适的下一跳路由。

### 2) 关键技术

SPEED 路由协议的实现包括延迟估计机制、SNGF 算法、邻居反馈策略和反向压力路由变更机制四个关键技术。

#### (1) 延迟估计机制。

延迟估计机制用于得到网络的负载情况, 判断网络是否发生拥塞。用单跳延时来近似模拟当前节点负载情况, 而延迟主要分为广播延迟和单播延迟两部分。通常使用单播数据包的延迟来决定下一跳节点的选择。单播数据包的延迟是指发送节点将数据分组加上时间戳后发送给邻居接收节点, 邻居节点记录收到数据分组到发出 ACK 的时间间隔, 并将其作为一个字段加入 ACK 报文。发送节点接收到 ACK 报文后, 从收/发时间中减去接收节点的处理时间, 并采用以下公式获得单播数据的延迟估计, 即

$$\text{delay}(k) = \alpha \times \text{delay}_{\text{new}} + (1 - \alpha) \times \text{delay}(k - 1) \quad (4.15)$$

式中,  $\alpha$  为当前延迟的权重, 用来衡量当前测得的延迟  $\text{delay}_{\text{new}}$  和前一时刻延迟  $\text{delay}(k - 1)$  的比重, 从而求出当前的平均延迟。

#### (2) SNGF 算法。

SNGF 算法主要用来选择满足传输速率要求的下一跳节点, 通过该算法将下一跳候选节点分为两组, 第一组中节点的传输速率大于给定的传输速率  $v_0$ , 第二组中节点的传输速率则小于给定的传输速率  $v_0$ 。在选择下一跳节点时, 通常使用第一组中的节点作为候选节点, 选择任意节点  $k$  的概率为

$$P(n = k) = \frac{(v_k)^\beta}{\sum_{k=1}^N (v_k)^\beta} \quad 1 \leq k \leq N \quad (4.16)$$

式中,  $v_k$  为节点  $k$  的传输速率,  $\beta$  为节点负载和传输延迟的权衡系数,  $\beta$  越大则端到端的延迟越小。

#### (3) 邻居反馈策略。

邻居反馈策略是当 SNGF 算法中找不到满足传输速率的下一跳节点时所采取的补偿

机制。定义数据丢失或低于给定传输速度  $v_0$  的传输都被定义为传输差错, MAC 层将邻居节点的传输差错信息反馈给转发比例控制器来获得转发概率, 该转发概率表示网络能够满足传输速率  $v_0$  要求的程度, 因此节点按照这个概率进行数据转发。

#### (4) 反向压力路由变更机制。

反向压力路由变更机制用来避免拥塞和路由空洞。当某个局部的节点负载较重时, 该局部节点的候选节点也将被标示, 在路由选择时, 这些节点与负载较重的节点一样, 不作为路由的被选节点, 从而减小网络拥塞。

SPEED 路由协议支持低延迟和低适配率, 可用于对时间敏感度要求较高的无线传感器网络, 同时由于在建立路由时能量开销相对较小, 所以 SPEED 路由协议支持网络能量的高效利用。但是 SPEED 协议只能支持一个传输速率, 这阻碍了应用的多样化。

## 4.4 传输协议

无线传感器网络传输协议是运行在传输层的网络协议, 其主要作用是利用下层提供的服务向上层提供端到端可靠、透明的数据传输服务, 成为网络层与应用层之间的桥梁。通常, 无线传感器网络传输协议需要根据应用层特定的可靠度需求, 提供源节点与汇聚节点间的差错控制机制; 根据输入网络的信息量来提供拥塞控制机制进行调节, 从而提高数据传输的可靠性和网络的服务质量。但是由于无线传感器网络节点的能量、处理能力和硬件的限制, 且传输协议通常与特定应用相关等, 导致传统的无线网络传输协议并不适用于无线传感器网络, 因此必须设计适合无线传感器网络特征的高效传输协议, 才能有效解决网络中的拥塞控制和数据丢失问题, 保证数据传输的可靠性和网络的服务质量。

### 4.4.1 传输协议的特点及分类

传统 IP 网络通过 UDP (User Datagram Protocol) 和 TCP (Transport Control Protocol) 传输协议, 实现了基于重传的端到端差错控制和基于窗口的拥塞控制, 解决了可靠数据传输问题。无线 Ad Hoc 网络也从自身特点出发设计了一系列传输协议解决网络拥塞和可靠传输问题。但是由于无线传感器网络中节点能力的限制和特殊应用需求的限制, 导致传统有线和无线网络的传输协议并不适合无线传感器网络。无线传感器网络传输协议设计必须考虑以下自身特点。

#### 1. 多对一或一对多传输模式

传统的传输协议, 如 TCP 采用端到端的差错控制和拥塞控制机制, 为端到端或点对点的通信提供可靠性保障。但是对于无线传感器网络而言, 从一组传感器节点收集信息比从单一传感器节点收集信息更重要, 因此在无线传感器网络中通信模式通常是多个传

感器节点向一个汇聚节点传输或者一个汇聚节点向多个传感器节点发送。这就导致在对无线传感器网络传输协议的设计时,需重点考虑上行的多对一数据汇聚传输模式,以保证数据的可靠传输。

## 2. 应用相关性强

无线传感器网络事件的检测应用中,时效性最为重要;对于监测应用,可靠性最为重要。因此,传输层协议应充分考虑应用的类型,针对不同的性能指标、传输方式和传感器节点类型要求进行设计,从而实现简单高效的传输协议。

## 3. 能量高效

能量高效是无线传感器网络传输协议设计最为关注的重点,因此传输协议的差错控制和拥塞控制的目标应该在尽可能减低能量消耗的前提下实现,如发现汇聚节点的可靠性水平高于事件检测所要求的水平,那么信源节点可通过减少发送信息量来降低能量消耗。这在传统的有线网络传输协议中很少考虑。

## 4. 以数据为中心

无线传感器网络是任务驱动型网络,用户通常并不关心某个具体节点所产生的数据,而是对与任务相关的数据比较感兴趣。因此,传输协议可以不针对某个具体节点数据的可靠传输而设计,而是需要保证可靠地完成整个任务相关数据的传输。

无线传感器网络传输协议有多种分类方法,其中最常用的分类方法是根据功能划分为拥塞控制协议、可靠传输协议和混合协议。其中拥塞控制协议主要用于防止网络拥塞的产生,或缓解和消除网络中已经发生的拥塞现象;可靠传输协议主要用于保证传感器节点感知数据能够有序、无丢失、无差错地传输到汇聚节点,向用户提供可靠的数据传输服务;混合协议同时支持拥塞控制和可靠传输两种功能。本节介绍目前比较有代表性的传输协议,如图4-31所示,阐述各种传输协议的基本思想以及采用的关键技术,在此基础上对传输协议的性能归纳总结。



图 4-31 传输协议概览

### 4.4.2 拥塞控制协议

拥塞是一种网络状态,当网络传输的数据超过网络负载能力时,网络传输性能将开始急剧下降。因此需要拥塞控制协议避免网络拥塞,及时检测和缓解网络中出现的拥塞现象,拥塞控制是无线传感器网络服务质量保证的关键技术之一,它包括拥塞避免和拥塞消除两种机制,其中拥塞避免是通过速率分配或传输控制等方法来避免局部或全网范围内出现拥塞;拥塞消除是在网络发生拥塞后通过采用速率控制、丢包等方法来缓解或

消除拥塞。典型的拥塞控制协议有基于速率控制的 CODA (Congestion Detection and Avoidance) 协议、基于分层网络结构的 Siphon 协议、基于多对一树形传输结构的 CCF (Congestion Control and Fairness) 协议和基于轻量级节点缓存状态管理 (Congestion-Avoidance scheme based on Lightweight Buffer Management, CALB) 的拥塞避免协议等, 本节将重点介绍 CODA 和 Siphon 两种比较有影响的拥塞控制协议。

## 1. CODA 协议

CODA 协议是 Wan 等人提出的基于速率控制的拥塞控制协议, 其目标是检测和避免无线传感器网络中的拥塞, 解决突发性或频繁性事件数据流引起的网络拥塞。该协议主要考虑了三种主要的拥塞情形: 信源节点频繁产生数据流引起的拥塞 (由于无线信道竞争导致在信源节点附近发生拥塞); 在低速数据流应用中, 因存在多个数据流需要服务, 则可能产生暂时的热点引起的拥塞; 以及由于网络容量和拓扑结构导致的持续热点引起的拥塞。

### 1) 基本思想

CODA 协议的实现主要通过拥塞检测和拥塞控制, 其中汇聚节点拥塞检测主要采用基于信道负载和缓存占用监测的机制, 并通过开环逐跳反压力机制告知信源节点网络拥塞; 然后通过闭环多信源调节机制来调节源节点数据传输速率, 逐步控制网络拥塞情况。

### 2) 关键技术

CODA 协议实现的核心包括基于信道负载和缓存占用监测的拥塞检测机制、开环逐跳反压力机制和闭环多信源调节机制三个部分。

#### (1) 基于信道负载和缓存占用监测的拥塞检测机制。

及时准确的拥塞检测在拥塞控制占有重要的地位, 目前采用的检测策略一般是基于节点缓冲区队列长度的检测, 基于无线信道占用竞争状态的检测和基于节点数据发送速率的检测三种方式。但这些检测策略并不完全可靠, 如在基于节点缓冲区队列长度的检测机制中, 一般认为缓冲区队列越长, 节点周围的拥塞程度越高。但实际中可能由于无线信道的竞争, 分组根本无法发送到某一节点, 该节点的缓冲区占用很小甚至为空, 但实际上网络中已经出现了拥塞的情况。

CODA 协议结合无线信道当前负载情况和当前缓冲区使用情况, 综合判断是否出现拥塞。CODA 协议采用了一种抽样的方案, 即在适当的时候才会激活运行监控程序以实现能量代价最小化, 而节点大部分时间处于休眠状态, 其无线通信模式也处于关闭状态, 当传感器节点需要发送数据时先进行信道监测, 判断是否有空闲的信道可用, 也就是说这时传感器节点无线通信模块处于侦听模式。因此传感器节点启动拥塞检测的最佳时间即在节点的发送缓冲区不为空时, 也就是传感器节点启动拥塞检测的最佳时间。

#### (2) 开环逐跳反压力机制。

当传输路径上的接收节点检测到拥塞发生时, 就广播抑制消息给它的邻居节点, 同

时调整数据发送速率防止拥塞向下游传播。抑制信号会沿着路径向上游节点传输,上游节点在接收到抑制信号后会根据本地拥塞策略调整数据发送速率或者丢弃数据分组,同时根据本地的网络状况决定是否继续向上游传播抑制信号。譬如,有些节点在接收到抑制信号后立刻启动本地的丢包策略,防止队列长度增长,并不继续向上游传播抑制信息。

### (3) 闭环多信源调节机制。

CODA 协议采用闭环方式动态调节数据源速率,汇聚节点会周期性地向全网反馈 ACK 消息。当源节点的发送速率小于某一门限值时,源节点自己控制速率;当超过设定的门限值时,闭环调节机制就会触发,源节点根据 ACK 情况进行速率调整;若源节点收到 ACK 消息则维持速率不变,否则降低速率。

## 2. Siphon 协议

Siphon 协议是 Wan 等提出的基于流量控制的拥塞控制协议,该协议主要基于分层网络结构,通过增加虚拟汇聚节点进行分流来实现对拥塞的控制。

### 1) 基本思想

Siphon 协议实现的基本思想是:在网络中部署少量具有多模无线通信能力的强功能传感器节点,作为虚拟汇聚节点,每个虚拟汇聚节点使用基于 IEEE802.11 的长距离无线通信方式与实际汇聚节点通信,而使用短距离无线通信方式与附近的传感器节点进行通信,从而将网络形成两层网络结构。但 Siphon 协议的通信模式增加了额外的通信硬件,并且要对强功能节点进行有效地部署才能起到作用。

### 2) 关键技术

Siphon 协议实现的关键技术包括四个步骤:① 虚拟汇聚节点在附近范围内广播自身的信息,传感器节点收到信息后将建立到达虚拟汇聚节点的路由,从而将网络分成由数个虚拟汇聚节点担任中心节点的区域;② 虚拟汇聚节点使用与 CODA 协议类似的基于信道负载和缓存占用率的拥塞检测方法;③ 发生拥塞时,传感器节点通过重定向方式将数据流量转发到附近的虚拟汇聚节点,同时虚拟汇聚节点启动长距离通信模块与实际汇聚节点进行通信转发,对网络流量进行分流;④ 若虚拟网关之间的长距离通信网络也发送拥塞,将采用一定的 MAC 层调节机制或缩小初始广播范围来进行控制,同时虚拟汇聚节点也可以向区域成员节点回复消息,动态调节成员节点的数据发送速率。

针对无线传感器网络多对一通信模式而引起的越靠近网关节点网络流量越大,更容易引发拥塞的“漏斗现象”,Siphon 协议通过增加额外的硬件设备较好地解决了该问题,实现了汇聚节点附近的分流。但是 Siphon 协议仍存在不足,如虚拟汇聚节点只用于发生拥塞时的分流,没有充分利用其强大的处理能力,因此导致虚拟汇聚节点能力的浪费。

### 4.4.3 可靠传输协议

可靠传输协议主要为了保证传感器节点数据能够有序、无丢失、无差错地传输到汇聚节点,向用户提供可靠的数据传输服务。可靠传输协议主要采用丢包恢复、冗余传输和速率控制等基本机制实现,典型的可靠传输协议有面向下行通信的、基于数据块的 PSFQ(Pump Slowly, Fetch Quickly)可靠传输协议、面向上行通信的 RMST(Reliable Multi-Segment Transport)数据块可靠传输协议、基于数据包的 GRAB(Gradient Broadcast)可靠传输协议、基于数据流的 ESRT(Event-to-Sink Reliable Transport)可靠传输协议和基于数据库选择性重传机制的可靠传输协议 GARUDA 等,本节将重点介绍 PSFQ 和 RMST 两种比较有影响的拥塞控制协议。

#### 1. PSFQ 可靠传输协议

PSFQ 可靠传输协议是 Wan 等人提出的一种面向下行通信的数据块可靠传输协议,适用于从汇聚节点向一组传感器节点或网络中所有节点传输数据的通信模式,并为其提供可靠的传输保证。

##### 1) 基本思想

PSFQ 可靠传输协议采用逐跳的报文恢复机制进行数据传输,当发现报文序列号缺失或错误时,中继传感器节点会要求它的上一跳节点重传该报文,从而保证每个传感器节点都能够收到来自汇聚节点的全部分组报文。其基本思想是在逐跳传输分组报文时,上一跳节点以较慢的速率发送分组,下一跳节点发现分组丢失后,立即向上一跳节点请求重传,通过缓发快取的方式进行传输控制,实现可靠传输。

##### 2) 关键技术

PSFQ 可靠传输协议实现的可靠传输包括分发操作、提取操作和状态报告三种核心操作。① 分发操作是指汇聚节点给要发的数据块中的分组分配序列号,然后按序向下一跳节点进行转发,接收到的节点也是依次按序向下一跳节点进行转发,并且序号相邻分组的发送需要保持一定时间间隔,以保证每个分组有一定的本地缓存时间以备重传。② 提取操作是指下一跳节点在检测到分组丢失时,向上一跳节点请求重传,待收到所有丢失的分组后再按顺序下行转发,如果向上游节点请求数据分组失败后,则可以将该请求向更远的上游节点请求丢失分组重传,直到从上游节点收到所有丢失的分组数据。③ 状态报告操作是汇聚节点要求距离较远的传感器节点逐跳报告自己的地址和收包情况,根据节点的汇报信息,汇聚节点判断数据块的分发情况和网络状态信息。

PSFQ 可靠传输协议通过上述操作实现差错恢复的原理如图 4-32 所示。

节点 A 将数据块分成三个分组按序向节点 B 传输,当节点 B 向节点 C 发送分组 2 时出现差错,节点 C 在一段时间内没有接收到分组 2,将会向节点 B 发送请求重发 NACK

包。当节点 C 接收到分组 2 后, 再按序转发数据分组。当汇聚节点 A 需要节点 D 反馈状态报告时, 节点 D 立即发送一个报告消息进行响应, 其路径上的每个节点都可以将各自状态信息加入到该报告中, 发送给汇聚节点。

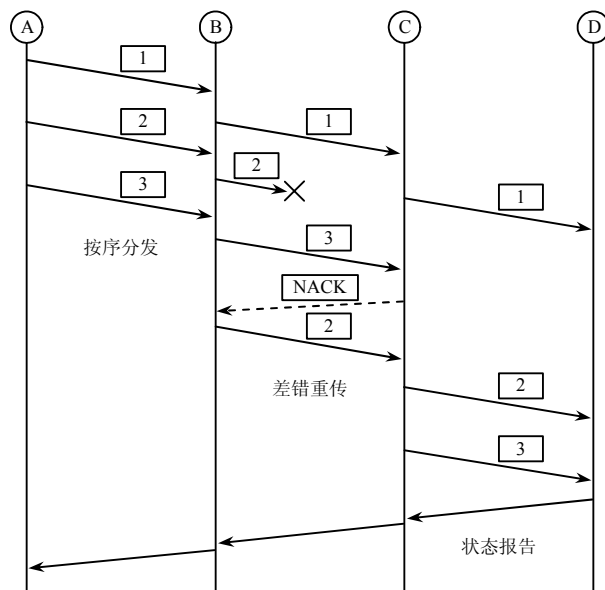


图 4-32 PSFQ 协议实现差错恢复的原理

PSFQ 可靠传输协议采用一种不需要端到端可靠机制的简单协议操作, 所以能够很好地与网络适配, 并且以分布式的方式提供了从汇聚节点到传感器节点方向上的可靠和有序的数据包传输。但是 PSFQ 可靠传输协议采用慢分发操作实现可靠传输, 因此对于大规模无线传感器网络, 数据传输将会遇到比较大的传输延时。

## 2. RMST 可靠传输协议

RMST 可靠传输协议是 Stann 等人提出的一种面向上行通信的数据块可靠传输协议, 是最早应用的传输层协议之一。RMST 可靠传输协议通过改进定向扩散协议的梯度过滤模块和增加后向反馈路径, 来保证数据的可靠传输。

### 1) 基本思想

RMST 可靠传输协议实现可靠传输的基本思想是源节点将发送给汇聚节点的数据块分解成数据包进行分发, 每一个数据包都被标示一个唯一的序号, 接收端通过监测序号是否遗漏来监测数据包是否丢失, 在数据包丢失的情况下, 需发送 NACK 消息包请求丢失数据包的重传, 从而实现端到端的丢包恢复。同时 RMST 可靠传输协议建议 MAC 层使用自动重传请求 (Automatic Repeat-reQuest, ARQ), 以提高链路传输的可靠性。

### 2) 关键技术

RMST 可靠传输协议采用缓存和非缓存两种模式实现数据可靠传输, 下面对两种模

式的核心过程进行阐述。

#### (1) 缓存模式。

缓存模式是指需要对汇聚节点和传输路径中特定的传感器节点数据分组进行缓存,融合下游节点发送过来的数据,并周期性地检测数据分组是否丢失。若发现数据分组丢失,则沿反向路径逐跳发送 NACK 消息包,请求丢失包的重传。当下游节点收到 NACK 消息包时,如果存在丢失包的缓存,则将该丢失包缓存发送给上游节点;如果下游节点没有丢失包的缓存,则向源节点转发 NACK 消息包请求数据重传。

#### (2) 非缓存模式。

非缓存模式与传统传输层协议比较类似,只有源节点和汇聚节点在可靠性传输中发挥作用,路径上的其他节点对数据分组并不进行缓存,同时只有汇聚节点对数据分组进行丢包监测。当汇聚节点监测到数据分组存在丢包时,将会沿反向路径发送 NACK 消息包向源节点请求重传,源节点接收到汇聚节点的 NACK 消息包后,将丢失的数据包重传给汇聚节点,从而实现了端到端的可靠传输。

RMST 可靠传输协议针对不同应用提出两种丢包恢复模式,其中缓存模式利用网络内的高速缓存提供快速的丢包恢复服务;非缓存模式减少多跳路径中中继节点的协作,降低了额外处理、存储的麻烦和功耗。但 RMST 可靠传输协议缺少有效的拥塞控制机制以及降低节点能量消耗的机制,同时存在网络数据传输时延较大和能耗较高等问题。

### 4.4.4 混合协议

以数据为中心的通信模式是无线传感器网络信息传输的主要特点,对于用户而言,关注的重点是某一事件的多个传感器节点的综合信息,而不是单个传感器节点的信息。因此无线传感器网络的数据可靠性测量依据通常是与一个事件相关的所有传感器节点数据包成功传输的情况。通常情况下,可靠性随着数据的上报频率增加而不断增强,但是当上报频率超过一定阈值时,将会导致网络拥塞而造成数据不断出错或丢失,从而可靠性降低。由此可以发现,无线传感器网络网络拥塞和可靠传输是息息相关的,在进行传输协议设计时,需要充分考虑这两个相互制约的因素。目前,典型的基于拥塞控制和可靠传输的混合协议有:可支持多种类型数据流的分布式 STCP(Sensor Transmission Control Protocol)协议、基于速率控制的 RCRT(Rate-Controlled Reliable Transport)协议、基于无线多跳网络的 EWCCP(Explicit Wireless Congestion Control Protocol)协议和基于分簇网络的 COMUT(Congestion Control for Multi-class Traffic)协议等,本节将重点介绍 STCP 和 RCRT 两种比较有影响的混合协议。

#### 1. STCP 协议

STCP 协议是 Iyer 等人提出的一种可支持多种类型数据流的分布式传输协议,可同时



提供网络拥塞控制和丢包恢复功能, 以实现拥塞控制与可靠传输的结合。为了减少汇聚节点所管理网络的规模, 该协议还引入了分簇概念, 利用分簇网络结构以实现分布式拥塞控制与可靠性传输。

### 1) 基本思想

STCP 协议的基本思想是依据不同数据流设计不同的丢包恢复策略, 具体是在所有节点内部设置最小门限  $T_l$  和最大门限  $T_h$  两个拥塞门限, 依据检测到的本地缓存队列长度是否超过  $T_l$  或  $T_h$ , 来对数据包头中的拥塞标志位按照不同的策略进行设置。汇聚节点依据收到的不同拥塞标志位来判断网络是否拥塞, 并决定是否采取策略避免拥塞, 以使网络恢复正常状态。

### 2) 关键技术

STCP 协议实现的关键技术包括: 基于 ETT (Estimated Trip Time) 超时阈值计算和拥塞检测与避免机制。

#### (1) 基于 ETT 的超时阈值计算。

ETT 是数据分组从源节点传输到汇聚节点的时间估计, 当汇聚节点没有收到数据分组时, 将向源节点发送一个 NACK 消息包请求数据分组重传, 同时启动定时器。当定时器计时超过基于 ETT 的超时阈值时, 汇聚节点就判断网络出现拥塞。因此基于 ETT 的超时阈值计算是 STCP 协议的关键, 在 STCP 协议中, 对于连续数据流的基于 ETT 的超时阈值  $R$  的计算方法为

$$R = T + \alpha \times \text{ETT} \quad (4.17)$$

式中,  $T$  表示连续数据流之间的时间间隔,  $\alpha$  为乘性因子。当汇聚节点接收到传感器节点的数据分组时, 会检测定时器计时是否在阈值时间  $R$  内, 如果在阈值时间内, 则乘性因子每次减少 0.5; 如果超出阈值时间  $R$ , 则乘性因子增加 0.5, 同时向源节点发送 NACK 消息包请求重传; 当源节点接收到 NACK 消息包时, 将重传相应的数据分组。

对于事件驱动的数据流, 汇聚节点无法估计数据分组的到达时间, 因此为了满足传输可靠性需求, 源节点需要通过 ACK 机制来确认数据分组是否传输到汇聚节点。只有当源节点接收到相应数据分组的 ACK 消息时, 才将对应的数据分组从缓冲区中删除, 如果在规定的时间内没有接收到 ACK 消息, 则重复对应的数据分组以实现可靠传输。

#### (2) 拥塞检测与避免机制。

STCP 协议通过在数据包头增加拥塞标志位来实现汇聚节点的拥塞检测, 当传感器节点检测到本地缓冲区占用率超过最小门限  $T_l$  时, 数据包头中的拥塞标志位将有一定的概率被置为 1, 当检测到本地缓冲区占用率超过最大门限  $T_h$  时, 则数据包头中的拥塞标志均置为 1。汇聚节点收到有标志的数据包, 依据拥塞标志位来通知相应的源节点降低数据发送速率或者重新选择路由, 以缓解或消除网络拥塞, 使网络恢复正常状态。

STCP 协议既可以支持连续数据流,也可以支持事件驱动的数据流,属于端到端的控制方案。其局限性是要求源节点和汇聚节点建立会话并保持会话相关的状态和计时器信息,同时在大规模的网络中,告知拥塞的消息传输延时较长。因此,STCP 协议的控制机制适用于解决持续时间长且较严重的网络拥塞。

## 2. RCRT 协议

RCRT 协议是 Paek 等人提出的一种基于速率控制的拥塞控制和可靠传输混合协议,比较适合需要传输大量数据、速率高且不允许丢失的应用,如无线多媒体传感器网络中的图像信息的传输、建筑物状态信息监控以及声源定位等。RCRT 协议采用端到端的丢包恢复策略,在汇聚节点处检测网络拥塞,绝大多数功能都由汇聚节点集中实现。

### 1) 基本思想

RCRT 协议实现拥塞控制和可靠传输的基本思想是将数据流分解成数据包进行分发,每一个数据包都被标示一个唯一的序号,汇聚节点检查到有数据丢包后,向源节点发送 NACK 消息包请求端到端的数据包恢复,同时汇聚节点以丢包恢复时间作为网络是否拥塞的监测指标。若丢包能够在一个往返时延(Round-Trip Time, RTT)内恢复,则认为网络无拥塞不需要拥塞控制;若丢包恢复时间超过两个 RTT,则网络拥塞需要拥塞控制。

### 2) 关键技术

RCRT 协议中的汇聚节点采用一种加性递增、乘性递减策略实现对网络拥塞的控制,汇聚节点根据丢包恢复时间决定增加或减少所有数据流的速率总量  $R(t)$ 。当网络不存在拥塞时,调节的速率总量为

$$R(t+1) = R(t) + A \quad (4.18)$$

式中,  $A$  为常量,当网络存在拥塞时,调节的速率总量为

$$R(t+1) = M(t)R(t) \quad (4.19)$$

式中,  $M(t)$  表示增/减参数,这由该段时间的收包率决定,计算公式为

$$M(t) = \frac{p_i(t)}{2 - p_i(t)} \quad (4.20)$$

式中,  $p_i(t)$  表示传感器节点  $i$  的数据分组成功传输率。

RCRT 协议是一种提供可靠保证和拥塞控制的传输协议,它让整个网络的拥塞检测在 Sink 端进行,并由 Sink 端发送全网的速率调节信息。但是,在大范围的网络中,远端节点到 Sink 节点的报文延时较大,当 Sink 节点接收到远端的拥塞信息再发回控制速率报文时,远端节点的拥塞可能已经缓解或者进一步恶化,这种机制在拥塞控制的准确性和时效性上会大打折扣。



## 第5章

# 无线传感器网络应用支撑技术

无线传感器网络是由应用驱动的网络，应用需求的深化直接影响了无线传感器网络的发展，其应用支撑技术是对传输来的各类传感器节点的感知信息进行综合处理，建立起物理世界与逻辑世界的联系，为无线传感器网络的各类应用提供具体的支撑。

当前无线传感器网络存在两个方面的研究，一是对无线传感器网络的基础理论研究，二是对无线传感器网络的实际应用研究。前者着重研究无线传感器节点的制造及各项性能的优化，对传感器网络构建的实现；而后者注重无线传感器网络在实际应用中关键问题的解决方法，其目标是实现无线传感器网络的实际应用。随着无线传感器网络的理论与应用的发展，有关应用的支撑技术备受关注。无线传感器网络的应用支撑技术从逻辑上可以分为两层，下层是基础的计算与存储，上层是在此基础上构建的各类应用服务。根据现代信息技术的发展趋势和无线传感器网络的自身特点，本章选取数据融合技术、协同监控技术、编码传输技术和大数据技术作为重点，进行详细阐述。



## 5.1 数据融合技术

无线传感器网络的基本功能是收集并返回其传感器节点所在监测区域的信息，其应用都是由大量的传感器节点构成，并共同完成信息收集、目标监视和感知环境的任务。传感器网络节点的资源十分有限，主要体现在电池能量、处理能力、存储容量以及通信带宽等几个方面。在进行信息采集数据传送的过程中，由各个节点单独传输至汇聚节点的方法并不合适，还会带来降低收集效率，影响信息采集的及时性等问题。为了避免这些问题，传感器网络在收集数据的过程中需要使用数据融合技术。数据融合的方法普遍应用在日常生活中，比如在分辨一个事物的时候，通常会综合各种感官信息，包括视觉、触觉、嗅觉和听觉等。单独依赖某一种感官获得的信息往往不足以对事物做出准确判断，而综合多种感官数据，对事物的描述会更为准确。在传统的传感器应用中，人们普遍关心的是监测结果，并不需要大量原始数据，因此数据融合是实现此目的的重要手段。

### 5.1.1 数据融合的定义

数据融合是将多份数据或信息进行处理，组合出更有效、更可靠、更符合用户需求的数据的过程，它涉及系统、结构、应用、方法和理论。

传统意义上定义包括如下两项。

(1) 信息融合 (Information Fusion) 定义为：在社会应用的上下文中，其包含了理论、技术和工具的创造和应用，用以在多个来源（传感器、数据库、人收集）的信息间进行协作。

(2) 数据融合 (Data Aggregation) 是针对来自数据源的数据集合，将原始数据处理为数量更少的精练数据，并将此精练数据传送给消费者。

实际上，我们可以理解数据融合为信息融合的另一个子集，是将多份数据或信息进行处理，组合出更有效、更符合用户需求的数据的过程。特别是对于无线传感器网络而言，提高精确度和节省能量是数据融合需要完成的首要任务。

### 5.1.2 数据融合的作用

在大多数无线传感器网络应用当中，很多时候不需要收到大量原始数据而只关心监测结果。在无线传感器网络中，数据融合起着十分重要的作用，主要表现在节省整个网络的能量，增强所收集数据的准确性以及提高收集数据的效率三个方面。

#### 1. 节省网络能量

无线传感器网络节点的冗余配置是建立在保证整个网络的可靠性和监测信息准确性

的基础上。在监测区域周围的节点,采集和报告的数据信息会非常相似,甚至接近,这会造成较高的数据冗余情况,在满足数据精度的前提下,将数据发送至汇聚节点,汇聚节点并不能获得更多的数据,相反会使网络的能量得到更多不必要的消耗。采用数据融合技术,可以处理掉大量冗余的数据信息,使得网内节点的能量得到有效的节省。

理想的数据融合情况下,中间节点可以把  $N$  个等长度的输入数据分组进行合并,使之成为一个等长的输出分组。在这样的情况下完成数据融合,就只需要消耗不进行融合所消耗能量的  $1/N$ 。即使数据融合效果不好,没有达到减少数据量的效果,但进行的融合操作可以减少分组的个数,从而达到减少信道协商或竞争过程中能量消耗的作用。

## 2. 增强数据的准确性

由于传感器网络部署在各种不同的环境中,导致传感器节点获得的信息不可靠性较高,这主要体现在三个方面:一是受到成本和体积的限制,节点装配的传感器元器件的探测精度一般较低;二是节点传送的数据由于无线通信的机制问题,很容易受到干扰而遭到破坏;三是由于环境的影响,不但会对数据传送造成不便,还会使节点的功能部件出现问题,无法正常工作而导致传送的数据信息出错。因此,要想获得较高精度的信息,就需要通过对监测同一对象的多个传感器所采集的数据进行综合,有效地提高信息的精度和可信度。

## 3. 提高收集数据的效率

在网络内进行数据融合后,收集数据的效率会有显著提高。这主要是因为融合操作减少了网络中待转发的信息量,减轻了拥塞程度,减小了网络端到端的传输延迟,得到的数据更为贴近应用需要。即使在极端情况下,网络中存在的数据量没有任何变化,但是分组数量在融合操作后肯定会变少,这样大大减少了节点竞争信道产生的冲突次数,提高了信道效率。网内数据融合虽然减少了能量的耗费,提高了数据收集的精度和效率,但也降低了网络的性能,增大了网络延迟和降低了网络的健壮性。

### 5.1.3 数据融合的分类

无线传感器网络中的数据融合技术可以从不同的角度进行分类,包括依据融合前后数据的信息含量进行分类,依据数据融合与应用层数据语义的关系进行分类,以及依据融合操作的级别进行分类这样三类。

#### 1. 依据融合前后数据的信息含量进行分类

根据数据进行融合操作前后的信息含量,可以将数据融合分为无损失融合和有损失融合两类。

##### 1) 无损失融合

在无损失融合中,所有的细节信息均被保留,只去除冗余的部分信息。此类融合的

常见做法是去除信息中的冗余部分。如果将多个数据分组打包成一个数据分组，而不改变各个分组所携带的数据内容，那么这种方式就属于无损失融合。它只是缩减了分组头部的数据和为传输多个分组而需要的传输控制开销，保留了全部数据信息。

时间戳融合就是一个无损失融合的例子。在远程监控应用中，传感器节点汇报的内容可能在时间属性上有一定的联系，可以使用一种更为有效的表示手段融合多次汇报。比如一个节点以一个短时间间隔进行了多次汇报，每次汇报中除了时间戳不同外，其他内容均相同；收到这些汇报的中间节点可以只传送时间戳最新的一次汇报，以表示在此时刻之前，被监测的事物都具有相同的属性。

## 2) 有损失融合

有损失融合通过省略一些细节信息或降低数据的质量，来达到减少存储或传输的数据量，节省存储资源或能量资源的目的。但在有损失融合中，信息损失的上限是必须要保留应用所需要的全部信息量。

很多有损失融合都是针对数据收集的需求而进行网内处理的必然结果。比如温度监测应用中，需要查询某一区域范围内的平均图文或最低、最高温度时，网内处理将对各个传感器节点所报告的数据进行运算，并只将结果数据报告给查询者。从信息含量角度来看，这份结果数据相对于传感器节点所报告的原始数据来说，损失了绝大部分的信息，仅能满足数据收集者的要求。

## 2. 依据数据融合与应用层数据语义的关系进行分类

数据融合技术可以在传感器网络协议栈的多个层次中进行操作，既可以在 MAC 协议中实现，也可以在路由协议或应用层协议中实现。根据数据融合是否基于应用数据的语义，可以将数据融合技术分为依赖于应用的数据融合（application dependent data aggregation, ADDA）、独立于应用的数据融合（application independent data aggregation, AIDA），以及结合以上两种技术的数据融合三类。

### 1) 依赖于应用的数据融合

通常数据融合都是对应用层数据进行的，需要了解应用层数据的语义。从技术实现角度来看，数据融合如果在应用层实现，则与应用数据之间没有语义间隔，可以直接对应用数据进行融合；如果在网络层实现，则需要跨协议层理解应用层数据的含义，如图 5-1 所示。

依赖于应用的数据融合技术可以根据应用需求获得最大限度的数据压缩，但可能导致结果数据中损失的信息过多。另外，融合带来的跨层理解语义问题给协议栈的实现带来困难。

### 2) 独立于应用的数据融合

鉴于 ADDA 的语义相关性问题，有人提出独立于应用的数据融合，即 AIDA。AIDA

直接对数据链路层的数据包进行融合然后转发，不需要了解应用层数据的定义，保持了网络协议层的独立性，不对应用层数据进行处理，不会造成信息丢失，但融合效率相对 ADDA 会很低。例如，将多个数据包拼接成一个数据包进行转发。这种技术将数据融合作为独立的层次实现，简化了各层之间的关系。如图 5-1 (c) 所示，AIDA 作为一个独立的层次处于网络层与网络访问层 (MAC) 之间。

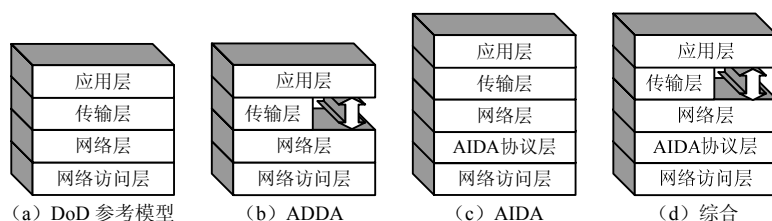


图 5-1 数据融合根据与网络层的关系的分类

### 3) 结合以上两种技术的数据融合

结合了上面两种技术的优点，同时保留 AIDA 层次和其他协议层内的数据融合技术，可以综合使用多种机制，得到更符合应用需求的融合效果。其协议层次如图 5-1 (d) 所示。

## 3. 依据融合操作的级别进行分类

根据融合中的数据抽象的层次来看，可以将融合划分成数据级融合、特征级融合和决策级融合三个层次。

### 1) 数据级融合

数据级的融合是最低层次的数据融合，用来处理同质数据，它是对传感器采集到的信息进行直接的融合处理，且对融合完成的结果进行特征的提取和决策判断。这个融合处理方法的优点是：数据量损失少，可以供给其他融合级别不能提供的细微的数据信息，精确度高。但它有以下局限性。

(1) 在数据级融合时需要处理的信息量非常大，所以处理的代价会很高且时间比较长，处理的实时性也较差；

(2) 由于该融合进行的场所是信息的最低层，因此要求融合时要具有较高的纠错处理能力以便解决传感器信息的不确定性、不稳定性和不完全性；

(3) 数据级融合要求处理的数据来自同一类传感器；

(4) 数据通信量大，抗干扰能力差。

数据级融合经常被应用在多源图像复合、同类雷达波形的直接合成及分析和理解领域，数据集融合方法如图 5-2 所示。

### 2) 特征级融合

特征级融合通过一些特征提取手段将数据表示为一系列用户感兴趣的特征向量，用

以反映事物的属性，是面向监测对象特征的融合。这种融合方式保留了足够数量的重要信息，在对信息进行压缩的情况下减少了干扰数据，利于数据的及时处理以及具有较高的精确度。

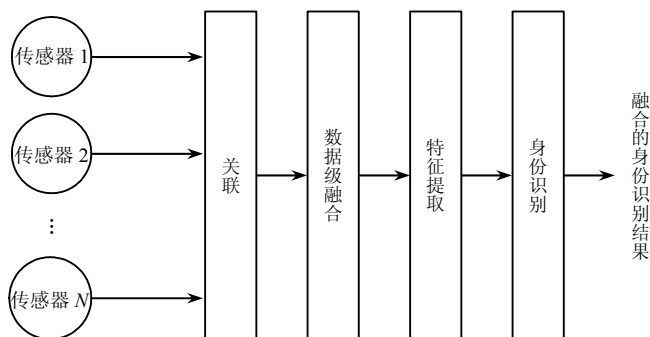


图 5-2 数据级融合

特征用来表示研究对象的行为、性能及功能等，这里所说的特征级融合方法，指的是首先从各传感器所采集的原始数据中抽取出一组特征信息，接着对各组特征信息来进行融合。

特征级融合跟通常所说的多属性决策是不同的，它一般包含下面三个步骤：

(1) 首先，将设定含有量纲的属性映射到 $[0, 1]$ 区间，以产生无量纲的量，这个无量纲的量被用到映射各个属性的信任度中。

(2) 其次，按照特定的融合规则对反映各个属性信任度进行信息融合，用于得出能够反映各备选方案的信任度的量化结果。

(3) 最后，根据融合的结果做出最后决策。

在上面的三个步骤中，最关键的要属第二步。第一步是在实际应用中所要面临的关键的问题，它没有固定模式可以进行遵循，而是与具体应用密切相关的问题，要视具体的情况来定；第二步与第一步紧密相关，即使已有很多方法可以用在属性融合中，可是都需要根据第一步得出的结果进行。如图 5-3 所示。

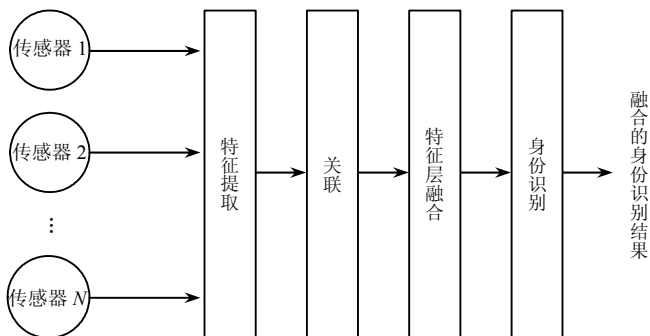


图 5-3 特征级融合



特征级融合是由目标特征信息和目标状态信息两类融合组成的。目标特征信息融合经常使用的方法主要包括人工神经网络、K 阶最近邻、特征压缩聚类法及参量模板法等，它是属于模式识别范围中的问题；而目标状态信息融合主要使用交互式多模型法、卡尔曼滤波、联合概率数据关联、多假设法及序贯处理理论等数学方法。

### 3) 决策级融合

决策级融合根据应用需求进行较高级的决策，是最高级的融合，一般在汇聚节点或者基站进行，这种方式要处理的信息量相对较少，有很好的实时性和很强的容错能力。

决策级融合是数据融合中的最高层次。它的原理是把来自各种各样的传感器数据经过预处理机构来进行预处理以后对被测目标进行独立决策，随后将各独立的决策进行信息融合，最终所获得的决策结果具有整体上的一致性。

决策级融合通常使用的方法包括 D-S 证据理论、Bayes 推理、模糊推理理论以及专家系统等。其结果是由三级融合产生的，由于它的针对目标是具体目标本身，所以决策级融合结果将会对决策的精确度产生直接的影响。

决策级融合首先是由每个传感器单独处理各自的数据并作出决策，最后将各自的融合结果传至融合中心进行局部融合决策。由于决策级融合数据损失量大，难免会导致精确度较低，但是它的优势在于具有较强的抗干扰能力，对传感器的依赖较小，通信量较少，并且对传感器是否为同类不做要求，以及处理过程花费的代价较低等，如图 5-4 所示。

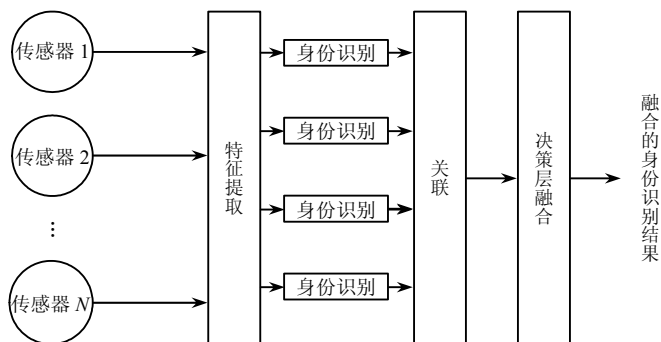


图 5-4 决策级融合

决策级融合、特征级融合都没有要求传感器一定是同类。除此之外，由于不同融合级别的融合算法都有各自的优/缺点，为了提高融合技术的精确度以及融合的速度，开发出高效的局部传感器融合策略及优化信息融合中心的融合规则是十分必要的。

## 5.1.4 数据融合的架构

### 1. 数据融合典型结构

数据融合能够减少全体或单个传感器检测信息的损失，并提高拥有多个传感器的智

能检测系统的性能。在多传感器数据融合的系统,从传感器与融合中心信息流之间的关系看,数据融合的结构由并行、串行、串并行混合及网络型共四种典型形式组成。串行结构和并行结构分别如图 5-5 和图 5-6 所示。

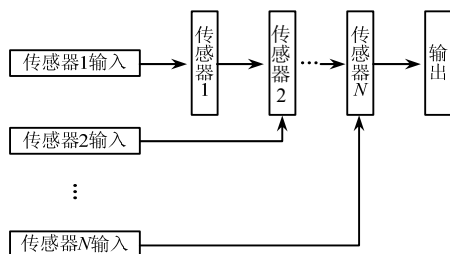


图 5-5 数据融合串行结构

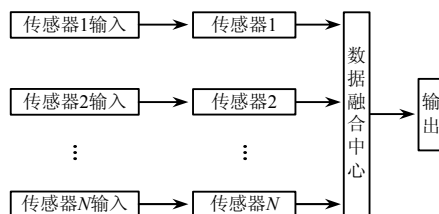


图 5-6 数据融合并行结构

串行多传感器的数据融合方法是先把两个传感器的信息进行融合,然后将融合的结果与另外一个传感器所采集的数据继续进行融合,如此方式依次进行,直到所有的传感器采集的数据全部融合完成为止。在使用串行结构融合时,单个传感器除了拥有接收信息数据、处理信息数据的功能外,还拥有信息融合功能,每个传感器处理的数据与上一级传感器所输出信息的形式有非常大的关系,最后的传感器在综合所有的前级传感器所输出信息后,获得的输出结果将会成为串联结构融合系统的结论。所以,在串行融合的情况下,上一级传感器的输出数据对下一级传感器的输出结构产生很大的影响。

并行多传感器的数据融合指的是所有传感器所输出的数据都将同一时刻输入到融合中心里,每个传感器之间都是相互独立的,融合处理中心对各种类型数据将采取适当的方法来综合处理,最后输出融合结果。所以,在并行融合的情况下,所有传感器输出的结果之间不会产生相互的影响。

串并行混合型结构的多传感器信息融合是将并行与串行两种形式综合的结构,既可以先进行串行再进行并行,也可以先进行并行再进行串行。

网络型的传感器信息融合结构比较复杂,每个子数据的信息融合中心被当成网络中的一节点。其输入既可能包含别的节点输出的信息,也有可能由传感器数据流,它最终的输出不但可以成为某个融合中心的输出结果,而且还可以是几个融合中心的输出结果,最后所得出的结论是所有输出的信息组合。

## 2. 数据融合的实现方式

应用场合不同,融合处理的实现方式也不相同,目前主要有集中式结构、分布式结构和混合式结构三种。处理结构不同则处理对象也是不一样的。集中式处理结构所针对的处理对象是由传感器得到的原始数据信息;而分布式处理结构所处理的对象是经过预处理的局部的数据信息;对于混合式结构的处理对象,既有原始的数据信息又有经过预处理的数据信息。

集中式的系统结构里，各个传感器所录取的检测报告将会被直接传送至数据融合中心，在此处对数据进行对准和互联、对航迹进行滤波和预测及跟踪等处理。集中式系统结构的信息量损失比较小，但是该结构对系统的通信能力有比较高的要求，融合中心的计算负担也会较重。此外，系统的生存能力将会降低，集中式数据融合系统结构如图 5-7 所示。

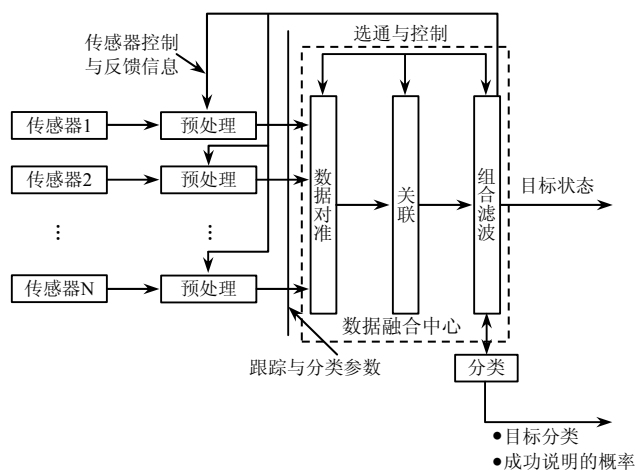


图 5-7 集中式数据融合系统结构

在分布式融合结构中，各个传感器的检测报告在被送入融合中心之前，先由其自身处理器对数据进行处理，生成局部的多目标跟踪航迹。接着，将已处理的数据传送到数据融合中心去，由融合中心来完成航迹关联以及航迹融合，以形成全局估计信息。与集中式数据整合系统相比，分布式的数据融合系统造价较低，但是可靠性较高而且通信量少。分布式数据融合系统结构如图 5-8 所示。

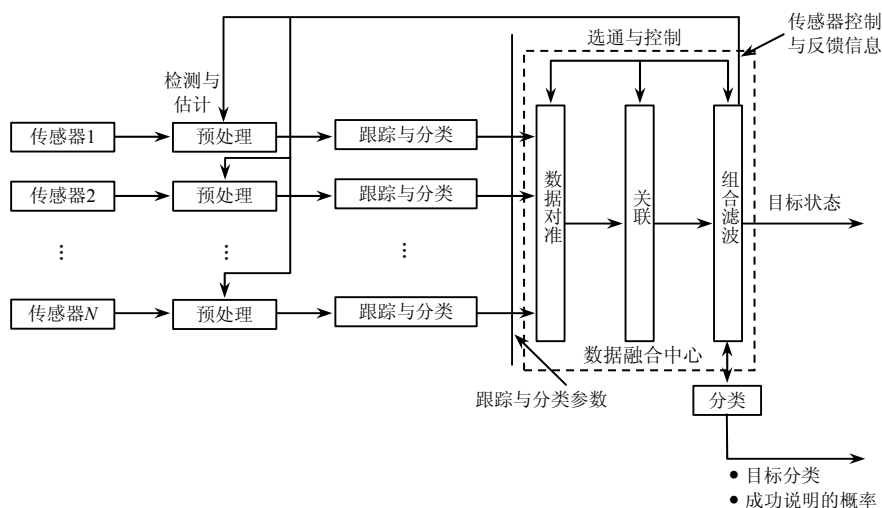


图 5-8 分布式数据融合系统结构

混合式的数据融合系统可以同时传送检测报告和在局部的节点处理已完成的航迹信息。但是其在信息计算中要付出昂贵的代价，然而它却有着集中式和分布式系统不能比的优点。所以在实际应用中，常常采用该类系统结构，混合式数据融合系统结构如图 5-9 所示。

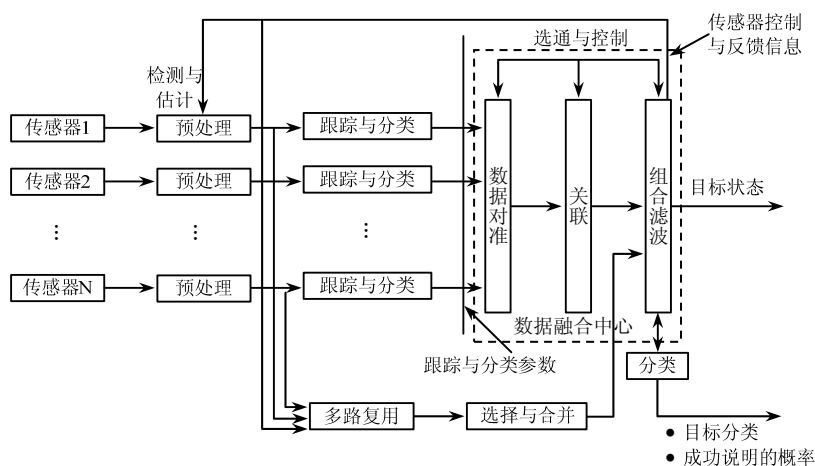


图 5-9 混合式数据融合系统结构

### 5.1.5 数据融合的方法

对于分布式融合处理架构而言，一般要求路由节点、汇聚节点都要具备一定的数据融合功能，路由节点可以根据具体的应用需求，选择进行融合处理或者不进行融合处理。当应用的场合传感器数量较多，数据冗余度较大时，在簇首节点上可以对采集的数据进行初步的融合，再发送给汇聚节点。感知节点的传感器由不同种类的传感器组成。无线传感器网络采取数据融合系统机制，通过减少数据传送，达到节省能量的效果。但是数据融合的策略，会带来数据压缩和数据精度的损失。因此，可以适当采取这种策略：当网络负载较轻时，不进行数据融合或进行低程度的融合；而在网络负载较重时，进行较高程度的融合。

无线传感器网络通用数据处理过程主要包括多传感器信息获取、数据预处理（滤波、特征提取）、数据融合（综合计算）等过程。由于多传感器的探测信息具有不同特征的观测值，如压力、温度、湿度和震动等，信息获取过程即是经过 A/D 转换将它们转换成能由计算机处理的数字量的过程；特征提取是对多个传感器的原始观测值进行特征提取转换，特征是可以用来传输和描述被测对象的，且能够表征不同传感器特征的统一特征向量；数据融合过程是采用数据关联、估计理论等方法，分析、补充和相互印证各传感器信息，形成综合结果。分布式传感器网络内的数据融合除了上述通用的过程，还有一个

很重要、因分布式传感器网络以数据为中心的协议过程产生的，即分布式网内每个节点的处理需要融合本地采集数据的估计值和上一节点的局部估计值的过程。布设传感器节点通常会考虑采用不同种类的传感器节点，但也有的应用只需要同类节点就足够了，比如房间温度的测定。因此无线传感器网络的数据融合算法除了考虑同类节点的融合，还要考虑异质节点数据的融合问题。

现有的无线传感器网络的数据融合方法主要分为经典方法和智能类方法两大类。经典方法采用很多统计理论和概率理论的思想，对传感器的探测模型进行建模，力求找到一种对传感器网络整体的最优融合方法。智能类方法采用一些类仿生学和推理类方法，试图用人工智能方法来解决传感器网络内数据融合的问题。这两类方法各有优点和缺点，本节先分析几种主要的数据融合方法，最后对这两类方法进行比较。

传感器网络内的数据融合方法都是建立在以下问题的基础上。

问题的提出：多传感器测量同一个（可能为多个）参数值时，假设第  $i$  个和第  $j$  个传感器测得的观测值为  $X_i$  和  $X_j$ 。融合目标是根据多个观测值求出估计值  $\hat{X}$ 。

### 1. 经典方法

传感器网络数据融合方法又称为融合估计方法，经典的方法有加权平均法、Bayes 估计方法和最小二乘估计方法。加权平均方法，其思想成熟，取算术平均的计算简单，是广泛使用的方法，其算法的变化主要表现在对权值的求取上。Bayes 估计方法和最小二乘估计方法都是统计领域经典的方法。

需要指出的是，在传感器节点硬件条件不满足的情况下，在传感器节点上可以不进行融合，或者只是进行简单的阈值判断。

#### 1) 加权平均法

加权平均方法，能够区分不同传感器的测量精度和重要性，有选择的对每个传感器节点进行划分，减少数据冗余的同时，准确提供更多检测信息和系统状态信息。各传感器节点对应不同的权值，融合节点按照不同的权值和观测值，做出融合估计和相应的决策。该方法效率较高，是广泛使用的方法。

用加权平均方法进行融合的原理是，假设对  $n$  个传感器的观测值进行融合，对于不同的传感器都应该具有相应的加权数，在总均方误差最小的这一最优条件下，根据每个传感器的测量值找到对应的最优权值，从而使融合后的  $\hat{X}$  达到最优。

设  $n$  个传感器的方差为  $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2$ ，要估计的真值为  $X$ ，各传感器的观测值分别为  $X_1, X_2, \dots, X_n$ ，它们彼此互相独立，并且是  $X$  的无偏估计，各传感器的加权因子分别为  $W_1, W_2, \dots, W_n$ ，则融合后的  $\hat{X}$  值和加权因子应满足

$$\hat{X} = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad \sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (5.1)$$

该权值的确定可以采用静态的方法和动态的方法多种方法。静态的方法主要是通过先验知识确定权值，或者通过各传感器的方差、传感器和目标的距离等参数确定权值。动态的方法中比较典型的有最小二乘估计。

## 2) Bayes 估计方法

Bayes 估计是指采用 Bayes 法则的融合估计方法，其方法是首先通过对大量统计数据进行分析，形成对数据的先验分布估计。然后由于 Bayes 理论把所有统计和推断建立在后验分布的基础上，反映在后验分布中，即后验分布综合了先验分布和样本的信息，然后把样本和原来的统计模型都丢掉，在下一次推断时又把现在得到的后验分布作为先验信息，每次取得样本后，对以前所得的分布结果进一步修正，这样对参数的估计会越来越准确。

Bayes 估计方法需要假设传感器的观测值服从一定的先验概率分布。假设  $n$  个传感器的观测样本  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ，待估计的参数为  $X$ ，假设服从高斯分布， $X \sim N(X_0, \sigma_0^2)$ ，样本服从  $X_n \sim N(\bar{X}, \sigma^2)$ ，则

$$P(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \exp\left\{-\frac{(X - X_0)^2}{2\sigma_0^2}\right\} \quad (5.2)$$

参数  $X$  的 Bayes 估计即使下列后验概率分布达到最大的  $X$  值的估计  $\hat{X}$

$$P(X | X_1, X_2, \dots, X_n) = \frac{P(X_1, X_2, \dots, X_n | X)P(X)}{P(X_1, X_2, \dots, X_n)} \quad (5.3)$$

$$\hat{X}^{\text{map}} = \arg \max_X P(X | X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (5.4)$$

Bayes 估计方法的缺点如下：

- (1) 所有假设事件要求相互独立，这在实际中绝大多数情况下是不能满足的。
- (2) 需要事先知道假设事件的先验概率  $P_i(X_i)$  和条件概率  $P_i(D_i | O_i)$ 。这两个条件比较难获得。以传感器网络目标检测为例，在布设传感器之前需要统计有目标出现的可能性。而且即使做了大量的统计，得到的数据仍然具有较大的偶然性。
- (3) 无法处理不确定性情况。

## 3) 最小二乘估计方法

普通的加权平均法一般不对传感器观测值进行融合估计，而是采用独立静止的方式对每次测量值进行加权平均，因此忽略了多次测量之间的联系和多传感器系统的动态环境中的客观性；而且静态地进行权值分配不能反映传感器的真实性能。因此，权值的确定要考虑传感器的不确定度是由传感器的精度和外界环境干扰所共同决定的。事实上，传感器系统是动态变化的，随着时间的推移，传感器设备可能出现故障，或外界环境等原因使传感器的测量精度出现变化。

本节尝试用最小二乘方法解决融合问题。最小二乘方法有很多优势，最初用来验证

正态分布和求解线性数据拟合问题, 是使用很广泛的传感器信息处理方法。其优点是很容易修改成为递推的最小二乘方法, 且计算不复杂, 时效性好, 很适合在计算资源有限的嵌入式系统中进行。

Bayes 估计方法, 需要知道先验分布情况, 而最小二乘方法可以设计成一种推广的最小二乘算法, 在分析多传感器测量模型的基础上, 依据最小二乘原理推导多个传感器对多个测量参数融合估计的加权公式, 从而得到各传感器加权融合系数和误差矢量的估计方差矩阵。

假设  $n$  个传感器的测量模型为

$$X_i = \mathbf{H}_i \mathbf{Y} + v_i \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5.5)$$

式中,  $X_i$  表示第  $i$  个传感器的观测值,  $\mathbf{H}_i$  表示第  $i$  个传感器的测量矩阵,  $v_i$  表示第  $i$  个传感器的测量噪声。

假设第  $i$  个传感器输出的观测值为  $X_i$ , 其权值为  $W_i$ , 所有  $n$  个传感器输出数据的融合结果可以表示为  $O = \mathbf{W}\mathbf{X}$ , 其中  $\mathbf{W} = (W_1, W_2, \dots, W_n)$ ,  $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ 。

由于  $O = \mathbf{W}\mathbf{X} = \mathbf{W}(\mathbf{H}\mathbf{Y} + \mathbf{e}) = \mathbf{W}^T \mathbf{Y} + \mathbf{W}\mathbf{e} = \mathbf{W}^T \mathbf{Y} + \mathbf{E}$ , 因此观测误差可以写成

$$J(\mathbf{X}) = \mathbf{E}^T \mathbf{E} = (\mathbf{X} - \mathbf{H}\mathbf{Y})^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} (\mathbf{X} - \mathbf{H}\mathbf{Y}) \quad (5.6)$$

根据最小二乘原理

$$\frac{\partial J(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} = -2\mathbf{H}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} (\mathbf{X} - \mathbf{H}\mathbf{Y}) = 0 \quad (5.7)$$

得到加权最小二乘估计

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{X} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \sum_{i=1}^n W_i X_i}{\left( \sum_{i=1}^n W_i \right)^2} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (5.8)$$

根据多元函数求极值理论, 可以求出总均方差最小时所对应的加权因子为

$$W_i = \frac{1}{\sigma_i^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5.9)$$

总结上述加权数据融合算法的计算步骤如下:

(1) 根据式计算出传感器  $i$  进行  $k$  次测量后的平均值为

$$\bar{X}_i(k) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_i(k) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5.10)$$

(2) 求出传感器  $i$  此时的  $\sigma_i^2$ ;

(3) 根据式 (5.9) 计算加权因子  $W_i$ ;

(4) 由下式计算出融合估计值  $\hat{X}$  为

$$\hat{X} = \sum_{i=1}^n W_i X_i(k) \quad i=1,2,\dots,n \quad (5.11)$$

## 2. 智能方法

智能类方法包含聚类算法、模糊逻辑、人工神经网络方法和 DS 证据理论方法等。

由于智能类方法是对整个传感器网络统一建模, 因此下面的讨论将不区分传感器节点和汇聚节点。

### 1) 人工神经网络方法

人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)方法是利用工程技术手段, 模拟人脑神经网络结构和功能的一门技术, 是一种大规模并行非线性的动力系统。神经网络可模拟人脑神经元的活动过程, 包括对信息的加工、处理存储和搜索等。

神经网络是由大量的处理单元(神经元)互相连接而成的网络。人工神经网络的信息处理由神经元之间的相互作用实现, 知识与信息的存储表现为网络元件互连分布式的物理联系, 人工神经网络的学习和识别取决于各神经元连接权系数的动态演化过程。

它主要具有以三个特点。

(1) 分布式存储信息: 神经网络存储信息的方式是把信息分布在不同的位置存储, 网络的某个部分不只存一个信息。神经网络是用大量神经元之间的连接及对各连接权值的分布来表示特定的信息。因此, 这种分布式存储方式即使在局部网络受损时, 仍能恢复原有的信息。

(2) 并行的信息处理过程: 每个神经元都可根据接受收的信息做独立的运算和处理, 然后再传输出去, 体现了一种并行性。神经网络对于特定的输入和输出, 可以比较输出节点和本身信号的强弱而得到特定的解, 体现了推理性。

(3) 自组织和自学习能力: 神经网络通过各神经元之间的连接权值的大小实现。权值可以事先确定, 能在使用中改变, 完成神经网络的学习过程。这是一种与传统符号逻辑完全不同的非逻辑非语言方法。

人工神经网络的主要模型可以分为前馈网络、反馈网络 and 自组织网络三种。

前馈网络是指信息只能由输入层逐层向下一层单元传递, 如 BP 神经网络(BPNN)和径向基函数神经网络(RBFNN)。

反馈网络的每个神经元都与其他神经元相连, 每一层的输出均通过权值反馈作为本层或前一层的输入。典型的反馈网络有 Hopfield 神经网络(HOP)、模糊神经网络(FNN)、脉冲耦合神经网络(PCNN)等。

自组织网络的主要特点是学习算法为无监督的自组织算法, 其主要功能是实现对输入特征向量的聚类, 且在此基础上用于完成函数逼近、分类和模式识别等映射。它最主



要用于知识的数据采集。

BPNN 是人工神经网络中最经典的网络,也应用最广泛,具有很好的函数逼近能力,其网络模型和 WDSN 中的数据处理模型很相似,图 5-10 是三层 BPNN 结构图。

上述 BP 神经网络的输入  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  对应矩阵  $\mathbf{T}$  每个单元,为每个权值  $w_{ji}$  赋初值 ( $0 < \text{初值} < 1$ ),利用已知的样本对神经网络进行训练,根据任一输入样本  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  的实际输出  $Y$  和对应的期望输出  $O$  修正每个权值  $\mathbf{w}$ ,然后从输出层开始,反向递推。

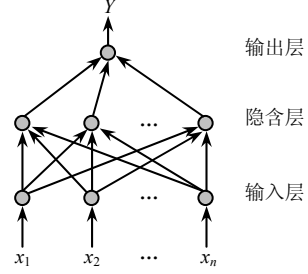


图 5-10 三层 BPNN 结构图

假设  $\eta$  为步长调整因子,神经元层  $i$  为输入层,神经元层  $j$  为隐含层,神经元层  $k$  为输出层,  $O_j$  和  $O_k$  分别为神经元层  $j$  和  $k$  的期望输出值,  $Y_j$  和  $Y_k$  为神经元层  $j$  和  $k$  的实际输出值。

每个神经元输出层的实际输出值与预测值的误差  $e$  可以写成

$$e = O - Y$$

根据均方误差 (MSE) 标准 (此处  $E$  表示期望) 可以表示为

$$J(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} E\{e^2\} = \frac{1}{2} E\{(O - Y)^2\} \quad (5.12)$$

通过适应性的修改权值  $\mathbf{w}$ , 可以使得式 (5.12) 的值最小化。在权值空间中,  $J(\mathbf{w})$  是权向量  $\mathbf{w}$  的二次函数, 对于所有权值, 式 (5.12) 均为正, 因此  $J(\mathbf{w})$  的 MSE 曲面有唯一的最小值  $\mathbf{w}^*$ , 并且是最优的。根据梯度下降法, 计算出对于权向量的度量梯度为

$$\nabla_{\mathbf{w}} J(\mathbf{w}) = \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}} \quad (5.13)$$

对于输出层神经元  $k$

$$\begin{aligned} \nabla_{\mathbf{w}} J(\mathbf{w}) &= \left. \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}} \right|_{\mathbf{w}=\mathbf{w}_{kj}} = \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial E_k} \frac{\partial E_k}{\partial w_{kj}} \\ &= \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial Y_k} \frac{\partial Y_k}{\partial E_k} \frac{\partial E_k}{\partial w_{kj}} = -(O_k - Y_k) Y_k (1 - Y_k) Y_j \end{aligned} \quad (5.14)$$

递推计算的权值  $\mathbf{w}$  可以表示成

$$\begin{aligned} w_{kj}(t+1) &= w_{kj}(t) - \eta \left. \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}} \right|_{\mathbf{w}=\mathbf{w}_{kj}} \\ &= w_{kj}(t) + \eta (O_k - Y_k) Y_k (1 - Y_k) Y_j \end{aligned} \quad (5.15)$$

令

$$\sigma_k = -\frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial E_k} = (O_k - Y_k) Y_k (1 - Y_k) \quad (5.16)$$

则

$$w_{kj}(t+1) = w_{kj}(t) + \eta \sigma_k Y_j \quad (5.17)$$

对于隐含层神经元  $j$

$$\begin{aligned} \nabla_w J(\mathbf{w}) &= \left. \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}} \right|_{\mathbf{w}=\mathbf{w}_{ji}} = \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial Y_j} \frac{\partial Y_j}{\partial E_j} \frac{\partial E_j}{\partial \mathbf{w}_{ji}} \\ &= \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial Y_j} Y_j(1-Y_j) Y_i = Y_j(1-Y_j) Y_i \sum_k \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial E_k} \frac{\partial E_k}{\partial Y_j} \end{aligned} \quad (5.18)$$

将式 (5.16) 代入式 (5.18) 得到

$$\nabla_w J(\mathbf{w}) \Big|_{\mathbf{w}=\mathbf{w}_{ji}} = -Y_j(1-Y_j) Y_i \sum_k \sigma_k w_{kj} \quad (5.19)$$

令  $\sigma_j = -Y_j(1-Y_j) \sum_k \sigma_k w_{kj}$ ，则得到

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \eta \sigma_j Y_i \quad (5.20)$$

通过对大量样本的学习，直到权值  $w_{ji}$  稳定，此时该 BP 神经网络检测器即可以用于传感网目标检测和分类。

BPNN 算法的缺点如下。

(1) 存在多个局部最少误差。由于 BPNN 是一种前馈网络，其输出取决于网络的输入和权值矩阵，这样导致全局最小误差可能不止一个。

(2) 算法收敛速度慢。大部分的智能算法都是通过训练误差反传修改网络权值来实现对客观对象的识别。而且对于一个非线性过程，其训练的过程比较漫长。不过可以用离线计算来弥补这个缺陷。

(3) 隐含层的神经元节点个数难以确定。目前尚无指导理论，都是采用一些估计的方法。

## 2) DS 证据理论方法

DS 证据理论方法具有比较强大的理论基础，它能够处理问题的不确定性，能将“不知道”和“不确定”区分开来，是近年来越来越重要的处理不确定性问题的智能方法。

它的缺点是，当证据严重冲突时，直接运用 DS 证据理论方法进行融合的组合结果往往与实际不符。证据的概率获取困难，需要大量数据进行统计分析。

设  $\Theta$  是判别框架，它表示的是一个试验所有可能的结果，所有假设的集合。一般地，在离散情形下记  $\Theta$  的幂集为  $P(\Theta)$  或者  $2^\Theta$ ，它是  $\Theta$  所有子集的集合。如果  $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$ ，那么

$$U = 2^\Theta = \{\emptyset, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N, (\theta_1, \theta_2), \dots, \Theta\} \quad (5.21)$$

因此，它包含有  $2^N$  个元素。

基本概论分配函数 (BPA) 给  $U$  中每个元素  $A$  赋予一个概率分配值  $m(A)$ 。 $m(A)$  反映了证据对判决  $A$  的确性程度, 即定义为  $m: 2^{\Theta} \rightarrow [0,1]$ , 且满足如下两个条件

$$m(\emptyset) = 0 \quad (5.22)$$

$$\sum_{A \in \Theta} m(A) = 1 \quad (5.23)$$

信任函数  $\text{Bel}(A)$  定义为  $A$  中所有子集的基本概率分配函数之和, 即

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \in A} m(B) \quad A \subset U \quad (5.24)$$

似然函数  $\text{Pl}(A)$  定义为

$$\text{Pl}(A) = \sum_{B \cap A = \emptyset} m(B) = 1 - \text{Bel}(\bar{A}) \quad (5.25)$$

例如, 传感网中的目标检测、识别框架可以这样定义:

在第  $i$  个传感器节点的  $t_i$  时刻的融合框架为

$$\Theta(t_i) = \{\theta_1 = \text{声音传感器}, \theta_2 = \text{震动传感器}, \theta_3 = \text{红外对射传感器}\} \quad (5.26)$$

在检测应用情况下的决策为: {有目标, 无目标}。

在分类应用情况下的决策为: {人, 摩托车, 履带车}等待分类的集合。

设  $\text{Bel}(A)$  和  $\text{Bel}(B)$  是同一识别框架  $U$  上的两个信任函数,  $m1$  和  $m2$  分别是其对应的基本概率赋值, 焦元分别为  $A_1, A_2, \dots, A_k$  和  $B_1, B_2, \dots, B_r$ , 又设

$$K1 = \sum_{\substack{i,j \\ A_i \cap B_j = \emptyset}} m1(A_i)m2(B_j) < 1 \quad (5.27)$$

则

$$m(C) = \begin{cases} \frac{\sum_{i,j} m1(A_i)m2(B_j)}{1 - K1} & \forall C \subset U, C \neq \emptyset \\ 0 & C = \emptyset \end{cases} \quad (5.28)$$

用证据理论方法解决传感网目标检测问题时, 给定的时间段是否有目标出现的事件构成的集合就是证据理论方法中的识别框架, 各个传感器通过测量、处理给出的对目标的检测结果就是证据。当有多个传感器分布给出各自的证据时, 就可以利用这些证据构造相应的基本概率分配函数。然后使用 Dempster 规则将这些基本含量分配函数融合产生一个新的基本概率分配函数。新的函数表示了融合所得的信息, 决策者可以根据决策规则进一步的决策。

表 5-1 给出了各种融合方法的比较结果。

表 5-1 融合方法的比较结果

融合方法		优 点	缺 点
经典方法	加权平均	简单、计算速度快	权值固定，不能动态调整
	基于 Bayes 估计的加权平均	权值可动态调整	需要先验知识
	基于最小二乘估计的加权平均	权值可动态调整，无须计算先验分布	不适合非线性模型，无法处理不确定情况
智能方法	人工神经网络	适应能力强，能够处理不确定情况	计算复杂，对嵌入式系统的 CPU 有要求
	DS 证据理论	模型直观，易于理解，能够处理不确定情况	对嵌入式系统的 CPU 有要求；需要先验知识

5.2 协同监控技术

由于目标信息空域广布、时域累积的，因此往往需有多个传感节点来对目标进行感知，协同监控技术是无线传感器网络中非常重要的应用支撑技术，本书从无线唤醒技术、联动探测技术、协同调度技术和目标跟踪技术四个方面详细阐述协同监控技术。

5.2.1 无线唤醒技术

无线唤醒技术是无线传感器网络节点提高能源效率和延长网络生命周期的一种有效的方法。它利用电磁波作为媒质对传感器网络内的节点的工作状态进行控制。电磁波本身就是一种能量方式，可以把这种能量收集起来，构成节点从睡眠到唤醒的一种触发信号。这种接收电路可以是无源的，或者仅占用极低的功耗。通过对无线传感器网络无线唤醒机制的研究，可以使无线传感器网络的性能更加优良，体积变得更小，节能方面也做得更好，对于传感器网络的发展是一种极大的推动。

无线唤醒技术主要包括节点无线唤醒和多传感器无线唤醒两种。

1. 节点无线唤醒

1) 问题提出

在无线传感器网络中引入无线唤醒机制，主要是为了在不降低性能的基础上解决无线传感器网络节点工作寿命过短的问题。根据无线传感器网络的现状，从单个节点的工作过程进行分析，目前的微控制器大部分是由单片机或者其他嵌入式设备构成，当节点程序进行周而复始的查询，传感器网络内的所有节点的工作模块和器件都要消耗能量。因此，延长无线传感器网络寿命可以从以下两方面入手。

(1) 增大携带电源能量，开发出大容量电池或者可以将太阳能、地热等从环境中获取的能量转换为电能并储存的电池。在原有传感器网络节点工作功率不变的基础上，通过增大携带电量来延长无线传感器网络的工作寿命，是延长传感器节点以及传感器网络

寿命的一种很好的方法。

(2) 在有限的电池能源的基础上, 通过提高无线传感器网络的能源利用效率, 使一定储量的电源得到最充分的利用, 从而达到延长传感器节点和传感器网络寿命的目的。当节点周围有事件发生时让节点工作, 而周围没有事件发生时让节点工作在极低功耗的睡眠状态, 同时降低无线传感器网络对信道进行侦听的次数和时间, 使无线传感器网络内节点的工作更有针对性。

以上两个方面的措施都将对无线传感器网络的发展具有非常积极的作用。就前者而言, 增大携带电池的容量是必然途径, 它可以用简单的方法来延长无线传感器网络的寿命。但同时增大电量也有其局限性, 无线传感器网络要求节点体积很小而且成本低廉, 电池容量的增大无疑会使节点的体积庞大而且成本增大, 这是与大量传感器节点分布和造价低廉的要求相违背的。对后者来说, 通过提高无线传感器网络的能源利用效率, 符合当今社会节约能源的潮流, 同时在无线传感器网络的组网和维护的成本上也带来极大的便利。所以, 开发出一种能够提高无线传感器网络能量利用效率的新型组网方式和新型节点, 对无线传感器网络的发展具有积极的意义。

无线唤醒机制的设计应该从单个节点的结构入手, 同时兼顾网络规划。通常情况下, 无线传感器网络节点由处理器模块、通信模块、传感器模块和电源模块四部分组成。通信模块可以处于发送、接收、空闲或睡眠四种工作状态, 空闲状态就是监听无线信道上的信息, 但不发送或接收信息。睡眠状态下通信模块不工作。

图 5-11 给出的是 Deborah Estri 在 Mobieom 2000 会议上的特邀报告 (Wireless Sensor Network, Part IV: Sensor Network Protocols) 中所述传感器节点各模块的能量消耗情况。从该图中可以看出, 传感器节点的大部分能量消耗在通信模块上, 通信模块处于发送状态时消耗能量最多, 而且通信模块在空闲状态和接收状态的能量消耗接近。相对而言, 通信模块处于睡眠状态时消耗的能量最少。随着集成电路工业的发展, 传感器模块和处理器模块消耗的能量也很少。

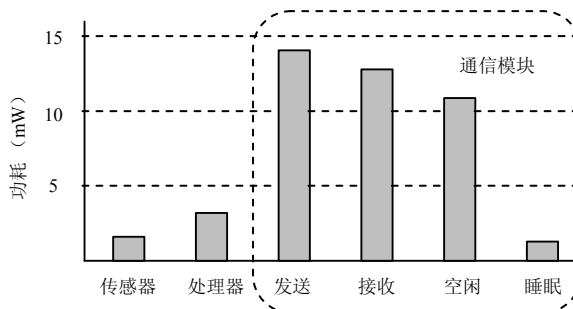


图 5-11 传感器节点各模块的能量消耗情况

通信模块在节点工作时是消耗能量最大的模块, 当节点处于发送状态时, 通信模块

的功耗达到 14mW 左右,而在接收和空闲的状态下,功耗也均在 10mW 以上。相比通信模块而言,传感器和处理器在节点工作消耗能量的比重都是很少的,均不足 5mW。经过计算,节点在高速运行时,通信模块占到了整个节点功耗的 70%左右,而传感器模块和微处理器模块则所占功耗分别为 15%和 10%。

进一步地,在对图 5-11 进行观察,发现通信模块在睡眠状态下的功耗也是很小的,大约在 2mW 左右。在对无线传感器工作机制和节点设计的过程中,应该充分考虑利用通信模块在睡眠状态下的低功耗特性。

由于无线传感器网络对目标区域的覆盖率和检测精度的要求,通常很难再降低传感器模块的能量消耗。而且,随着高性能传感器和集成电路的应用,传感器模块的能量消耗只占整个传感器节点能量消耗的很小一部分。这样,传感器节点的节能策略主要集中在通信模块和处理器模块上。根据对无线传感器网络节点各个模块工作状况的实际监测和观察,在无线传感器网络的运行中,很多情况下相应事件发生时需要工作的节点只是少量的,大部分节点的工作是无效的。另外,对单个节点而言,也并不是每时每刻都需要提供数据采集或转发数据包服务。事件的发生是随机而又短暂的,节点的通信模块并没有必要一直处于高速工作状态。经过测量和估算,如果一个节点始终保持在高速工作状态,事件发生时消耗的能量不到整个节点运行消耗总能量的 1%。

为了减少能源浪费,无线传感器网络通常采用睡眠/唤醒的工作方法:节点在周围没有感兴趣事件发生的时候,让通信模块和微处理器等其他模块进入睡眠状态。当有感兴趣的事件发生时或者传感器网络需要某个传感器节点工作时,唤醒微处理器和通信模块进入工作状态,来接收和处理事件的数据和信息。这种睡眠/唤醒的工作方法将使无线传感器网络节点中耗能占很大比重的通信模块在大部分时间内都处于睡眠状态,只在收到微处理器指令的情况下才进入接收和发送状态。

目前所采用的睡眠/唤醒的工作方式中,很多是采用定时时刻表的方法进行的。节点按照程序所设定的时间间隔有组织有顺序地进入睡眠状态或从睡眠状态唤醒进行工作,大幅度地提高了无线传感器网络的能源利用率,延长了传感器网络以及网络中单个节点的寿命。但是,这种利用定时唤醒的方法是在牺牲传感器网络实时性的基础上使无线传感器网络寿命延长的。为了保证无线传感器网络的灵敏度,睡眠/唤醒的周期不能设定的太长。周期太长,节点对事件相应的灵敏度就会降低,实时性下降。周期过短,无线传感器网络对数据采集的次数以及侦听信道的频率就会增加,使系统的灵敏度提高,但睡眠/唤醒周期缩短,必然使整个无线传感器网络单位时间内消耗的能量增大。在总的电源能量保持不变的情况下,睡眠/唤醒周期的缩短,将直接影响到无线传感器网络寿命的缩短。另外,在对定时唤醒机制的研究中很容易发现,很多次对无线传感器网络节点的唤醒是没有意义的。节点被定时唤醒后,会侦听一段时间的信道,观察是否需要为簇头节

点或周围其他节点提供服务, 不需要提供服务则再次进入睡眠状态。如果节点在被定时唤醒后发现恰好有事件发生, 节点就开始采集数据或者转发数据, 那么这种唤醒是值得的。但在定时唤醒中, 很多次的唤醒侦听信道会发现, 其实周围并没有事件发生, 之后节点会由工作状态再次进入睡眠状态。这种无效的睡眠/唤醒过程, 其实同样要消耗很多能量。

在研究了主动唤醒机制的基础之上, 无线唤醒机制充分吸收了定时唤醒中睡眠/唤醒工作机制的优点, 同时采用无线的方法对节点更加准确地唤醒。无线唤醒机制同样是从提高无线传感器网络能源利用率入手, 通过无线的方式对无线传感器网络的工作机制进行改进, 节点可以按需进行唤醒, 而不需要周期性地重复唤醒。

## 2) 理论基础

### (1) 麦克斯韦方程组。

节点无线唤醒归根到底是一种无线电磁波唤醒, 满足麦克斯韦电磁波方程组。麦克斯韦电磁波方程组是从电磁试验定理归纳出来的支配所有宏观电磁现象的一组基本方程组, 普遍情况下电磁场必须满足的方程组, 即

$$\left\{ \begin{array}{l} \iint \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum q_i \\ \int_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\varphi_m}{dt} = -\iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \\ \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \\ \int_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_{\text{trans}} + \iint_s \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \end{array} \right. \quad (5.29)$$

上式是麦克斯韦方程组的积分形式, 其中  $E$ 、 $B$ 、 $D$ 、 $H$  分别是描述电场 (指带电体产生的电场与变化磁场产生的有旋电场之和) 和磁场 (指电流产生的磁场与变化电场即位移电流产生的磁场之和) 的电场强度、磁感应强度、电位移和磁场强度;  $q$  为自由电荷、自由电荷体密度;  $I$  为传导电流强度。四个公式分别是电场、磁场的高斯定理、电磁感应定律及安培环路定理。

麦克斯韦方程组反映了一般情况下电荷电流激发电磁场, 以及电磁场内部的运动规律。在无源自由空间, 电场和磁场通过本身的互相激发而运动传播。麦克斯韦方程组揭示了电磁场的内部作用和运动。不仅电荷和电流可以激发电磁场, 而且变化的电场和磁场也可以互相激发。因此, 只要在某处发生电磁扰动, 由于电磁场的互相激发, 它就在空间中运动传播, 形成电磁波, 在理论上预言了电磁波的存在。同时, 更揭示了电磁场可以独立于电荷之外而存在。在迅变情况下, 电磁场以波动形式存在。变化着的电场和磁场互相激发, 形成在空间中传播的电磁波。由于在广播通信、光学和其他科学技术中的广泛应用, 电磁波的传播、辐射和激发问题已发展为独立的学科, 具有十分丰富的理

论和内容, 在本报告中只介绍关于电磁波的最基本的理论。电磁振荡能够在空间传播, 就是靠两条: 变化的磁场激发涡旋电场, 变化的电场 (位移电流) 激发涡旋磁场。

电磁振荡的传播机制示意图如图 5-12 所示。

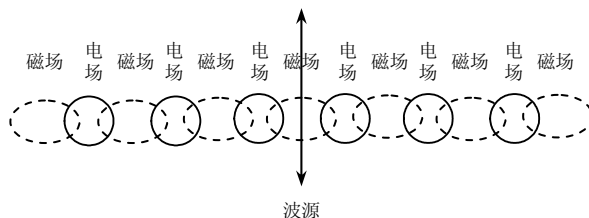


图 5-12 电磁振荡的传播机制示意图

电磁波在空间传播时会发生下面的现象影响其分布:

- ① 直射——电磁波直接传播到观测点。
- ② 反射和透射——当电磁波入射到两种介质的分界面上时, 一部分能量进入新介质形成透射波, 而另一部分能量反射回原来介质形成发射波。
- ③ 绕射——当辐射源和观测点间有障碍物时, 电磁波可以通过绕射方式到达测量点, 但是强度能量有很大损耗。障碍物的尺寸要小于等于电磁波的波长。如果障碍物尺寸大于电磁波的波长, 就会发生反射。所以由下式可知, 当波的频率越低, 波长越大, 绕射能力越强。

$$c = \lambda \times f \quad (5.30)$$

式中  $c$ 、 $\lambda$  和  $f$  分别代表电磁波传播的速率、波长和频率。

- ④ 干涉——当同频率的波经不同路径到达测量点时, 由于波的相位不同会产生同相相加, 反相相消的干涉现象。

## (2) 波束供电技术。

根据麦克斯韦电磁场理论: 变化的电场产生变化的磁场, 在变化的磁场周围又会产生变化的电场, 从而能量通过交变的电磁场辐射出去。接收天线能从变化电磁场中获得工作所需的能量, 即通过波束供电技术将接收到的射频能量转化为直流电能为内部电路供电。波束供电的原理如图 5-13 所示, 接收天线在电感和电容  $C_1$  上产生谐振电流, 电流通过二极管整流后在电容  $C_2$  上积累电量, 并提供芯片瞬间工作电流。

接收天线通过波束供电产生的功率可由下式给出

$$P_r = \frac{P_s G_s G_r \lambda^2}{(4\pi \cdot D)^2} \quad (5.31)$$

式中,  $P_r$  为接收天线产生的功率,  $P_s$  为发送源天线的功率,  $G_s$  为发送天线增益,  $G_r$  为接收天线增益,  $\lambda$  为电磁波波长,  $D$  为节点间距离。



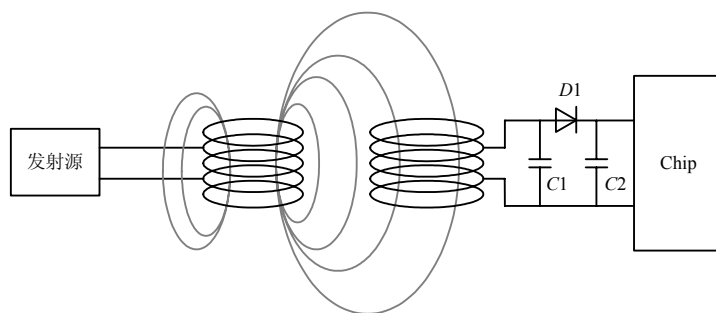


图 5-13 波束供电原理

由式 (5.31) 可知, 接收天线产生的功率  $P_r$  与电磁波波长  $\lambda$  的平方成正比关系。又波长  $\lambda$  与频率  $f$  有如下关系

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (5.32)$$

式中,  $v$  为电磁波的传播速度, 为恒定值。由此可得

$$P_r = \frac{P_s G_s G_r v^2}{(4\pi \cdot D f)^2} \quad (5.33)$$

因此由上式可知, 在发送天线增益  $G_s$  和接收天线增益  $G_r$  确定时, 可以通过降低电磁波频率或者提高发射端的发射功率来获得更远的唤醒距离。

在已知发射天线和接收天线的功率时, 接收天线能够产生的电压为

$$V_{in} = \sqrt{P_r \cdot P_s} \quad (5.34)$$

根据有效工作距离  $D$ 、发送天线增益  $G_s$ 、接收天线增益  $G_r$  及唤醒电压  $V_{in}$ , 就可以由式 (5.34) 得出发送天线的需求功率  $P_s$  为

$$P_s = \frac{4\pi \cdot D f V_{in}}{\sqrt{G_r \cdot G_s}} \quad (5.35)$$

当发送节点天线的功率不能在距离上满足需求时, 可以增加功率放大模块, 适当提高发送节点的发射功率。通常波束供电产生的电流很小, 无法直接用来产生传感器节点外部中断, 这就需要在接收节点唤醒模块处加大增益, 来产生足够的电平触发传感器节点外部中断。

### 3) 工作原理

无线唤醒即射频唤醒, 指具有一定波长可用于无线电通信的电磁波。无线唤醒归根到底是一种无线电磁波唤醒, 占据一定的空间通信信道。在空间通信信道中, 射频信号只能以电磁耦合或电磁波耦合的形式表现出来。所以, 无线唤醒的性能要受到电磁波空间传输特性的制约。

在无线传感器网络中, 一个节点的理想状态应该是: 当一个数据分组传送给这个节

点时, 该节点总是处于接收状态。当这个节点自己要发送一个数据分组时, 则该节点总是处于发送状态。而在其他时间内, 这个节点总是处于休眠状态, 不存在空闲状态。

一种唤醒 MAC 协议假定同时存在几个并行的信道, 采用不同的频率 (FDMA) 或者选用不同的码 (CDMA)。希望发送数据分组的节点从多个信道中选择一个信道并进行载波侦听。在进行了多次不成功的试探之后, 节点会等待一段时间, 然后再重新开始。如果载波侦听的结果是信道处于空闲状态, 则节点向接收机发送一个唤醒信号, 表示要使用接收机标识和信道。接收机会唤醒其数据收/发机, 并调谐到所确定的信道, 这样数据传输就可以开始了。传输完成之后, 接收机可以令其数据收/发机返回到休眠模式。上述无线唤醒的概念具有非常显著的优点, 使用这种技术时, 只有耗能非常低的唤醒收/发机处于经常工作状态, 而耗能相对较多的数据收/发机除了正在进行数据发送和接收时, 均处于休眠状态。

由 Miller 和 Vaidya 提出的协议与 STEM 协议有某些相似之处。这种协议使用两个不同的信道, 其中一个用做唤醒信道, 另一个用做数据传输。每一个节点均有一个能够存储  $L$  个分组的缓冲器。如果缓冲器已满, 则节点唤醒其所有的相邻节点, 并发送全部分组数据 (称为“全唤醒”)。然而, 如果通信量是有规律的, 源节点和目的节点一致同意在某个时间内仅目的节点被唤醒, 且各节点可以互相交换分组数据 (称为“触发唤醒”), 则在这种情况下, 发射机可以清空其缓冲器, 从而使成本较高的全唤醒不经常发生。

在 Lu 等人提出的 DMAC 协议中遇到下列问题: 如果由源节点向目的节点的传输过程所经由的各个节点均有其各自不同的唤醒时间表, 从源节点到目的节点所积累的等待时间就会非常显著。尤其是当各时间表不同步时, 每跳的等待时间会比较长。DMAC 协议试图依据与目的节点的距离来仔细安排唤醒时间表来解决此问题。在理想情况下, 一旦一个节点接收到一个分组, 就会启动其上行近邻的监听时段。

基于 ALOHA 协议和 CSMA 协议采用前同步码的技术中, 一个节点周期性地被唤醒, 并对媒体监听一段时间, 以检测是否有信号传输。如果有信号, 则节点试图接收这个数据分组。如果节点要发送数据, 它将形成一个带有前同步码的数据分组, 使这个数据分组足够长, 从而使接收机能够将其拾取。前同步码之后数据分组的其余部分将继续传输。该协议的一个问题是将接收机从休眠状态转换到空闲状态或者接收状态的启动能量需求问题。El-Horydi 等人提出让一个节点了解其相邻节点的唤醒时段, 并仅在接收模式开始之前启动前同步码部分, 以使前同步码部分的长度达到最小。

Lin 等人考虑了循环接收技术的不同方法, 在这种方法中, 节点周期性地被唤醒, 着重考虑发射机和接收机如何互相发现的问题。方法之一是让发射机反复发送一个较短的数据分组, 直到这些数据分组与接收机的监听时段相匹配, 并使接收机产生一个应答信息, 或者接收机在其监听时段开始时发送一个较短的信标分组。

总之, 在对无线传感器网络的研究中, 功耗和寿命问题分别涉及传感器网络和传感

器节点两个不同的层次,两者相辅相成。在网络层面上合理调度任务可以有效减少无线传感器网络节点盲目工作的概率,使节点更准确地被唤醒,提升节点电源的有效性;在传感器节点层面上的低功耗设计,不仅仅只采用低功耗的器件来降低节点工作时的能量消耗,更要注重在不降低节点工作性能的基础上建立更好的节点工作机制,从底层提高无线传感器网络的低功耗性能,提升网络品质。

依据射频信号的频率不同可分为低频和高频两大类。高频主要用于远距离信号传输,低频主要用于近距离信号传输。

无线唤醒机制在无线传感器网络中是利用射频信号来控制节点之间的触发响应和工作状态切换的。工作频率是无线唤醒机制最基本的技术参数之一,它在很大程度上关系到无线唤醒范围的大小、技术可行性以及成本的高低。在无线传感器网络的组网方式中,无线唤醒模块的作用是给微处理器模块一个中断信号,将其从睡眠状态唤醒到工作状态,传输的数据比较简单。另外从传感器网络实际需要出发,节点在分布时是按簇出现的,所以节点之间的分布并不是很远。根据这种情况,在对无线频段选择时,选用低频唤醒的方式比较符合传感器网络的特征。低频频段能量相对较低,数据传输速率较慢,但无线覆盖范围受限。这是因为低频功率损耗与传播距离的3次方成正比,而高频功率损耗与传播距离的2次方成正比,所以低频无线的覆盖范围要小。为了扩大无线覆盖的范围,可以采用多种方式,在低频传播的基础上采用一些措施,使无线唤醒信号的传输距离得到延长。比如,可以在信号发射端增大功放或调节增益等。低频唤醒方式对天线的方向性需要不是很强,有相对较强的绕开障碍物的能力。

#### 4) 保障机制

节点唤醒的保障机制主要是指抑制误唤醒与避免无效唤醒。通常情况下,无线信道的干扰情况远比有线信道恶劣得多。如果无线唤醒单元在收到与载波频率相当的噪声或其他发送源的干扰信号时,同样会在接收天线处产生感应电流,这时唤醒模块就会唤醒传感器节点和通信模块,但此时并没有数据传输,因此称这种情况下的唤醒为误唤醒。误唤醒会造成无谓的能量损耗。为解决这一问题,需要在无线唤醒模块加上导频计数功能,当无线唤醒单元在收到足够的导频信号之后才产生唤醒中断信号,唤醒无线传感器节点和通信模块。这样可以在很大程度上避免由误唤醒引起能量的浪费。

当节点收到不是企图唤醒自己的唤醒导频信号时,节点同样会被唤醒模块唤醒来接收数据,但此时接收的数据并不是节点需要接收的数据或称无效数据,一般称这种情况下的唤醒为无效唤醒。无效唤醒同样会带来能量的浪费。为解决这一问题需要在唤醒信号中加入地址标识,用来表示唤醒的对象。当唤醒模块收到唤醒导频信号后产生唤醒中断,以此唤醒传感器节点,但这时传感器节点并不唤醒通信模块。唤醒模块将继续接收地址标识信息,由传感器节点识别地址标识,在确认需要唤醒通信模块后才唤醒通信模

块来接收和发送数据。这样就避免了无效唤醒带来的能量浪费。

## 2. 多传感器无线唤醒

现在比较常用的一种工作机制是主动唤醒机制，主动唤醒机制的提出，延长了无线传感器网络的寿命，但同时也降低了系统的实时性。节点间协同唤醒机制是一种按需唤醒的工作机制，不仅对网络的实时性损害很小，而且最大程度地降低了传感器网络和传感器节点的功耗，从而使节点和网络的寿命都得到延长。

### 1) 工作原理

一般的无线传感器网络节点都是以低功耗单片机或 DSP 器件等微处理器为核心器件设计的。程序设计中功能任务的完成基本上都是靠代码不停循环执行来实现的，这样不论如何对程序进行优化，使代码变长或者变短，都无法从根本上降低传感器节点的功耗。在多数传感器网络的应用中，监测事件具有很强的偶发性，节点上所有的工作单元没有必要时刻保持在高速的工作状态。处于睡眠状态，甚至完全关闭，必要时加以唤醒是一种有效的节能方案。设计中将利用无线唤醒的方式，对传感器节点的主要耗能模块的工作方式进行控制。使节点在不需要工作的时候处于超低功耗的状态，而在工作时再把节点调整至大功耗运转状态，由此提高传感器网络节点的能源利用率，从而延长无线传感器网络节点的寿命。

在无线唤醒机制中，当节点进入睡眠状态时，不再需要周期性的返回到工作状态，而是通过一个特殊的低功耗无线唤醒模块对事件进行监控和判断分析。当无线唤醒模块接收到一定频段的无线唤醒信号时，无线唤醒模块需要初步判断是否是唤醒该节点的射频信号，如果是，就由无线唤醒模块的模拟电路搜集电磁波能量，形成一个真正的唤醒信号，以中断的形式唤醒微处理器模块，由微处理器模块再将节点的其他模块从睡眠状态唤醒。这样的话，相对定时唤醒而言，节省了周期性唤醒、侦听的能量消耗。在对唤醒信号的设定中，除了用硬件的形式对微处理器接口进行中断触发外，也需要在软件方面加以协调。从软件的实现方法上讲，可以采用一种唤醒数据包的方法，如果节点接收到唤醒数据包，则由软件控制使节点上的模块进入工作状态。而如果纯粹从软件上来实现的话，有其局限性，并且实现过程非常复杂。如果从硬件上着手改进，不但实现起来简单易行，而且对无线传感器网络节点的能量消耗会更加节省。

在网络中，根据功能的不同可以将节点分为路由节点、簇头节点和普通节点三类，如图 5-14 所示。路由节点向簇头节点或者普通节点发出无线唤醒信号，当簇头节点或者普通节点接收到特定的射频信号后，由睡眠状态转换到工作状态，对环境中的数据进行采集和处理，形成供无线传感器网络传送的数据包。节点被无线信号唤醒之后，需要继续工作一定时间，再侦测是否继续处于工作状态。需要的话则继续维持在工作状态，进行数据采集或数据转发服务；不需要工作的话，就自动切换到低功耗的睡眠状态，等待

下一次被唤醒。

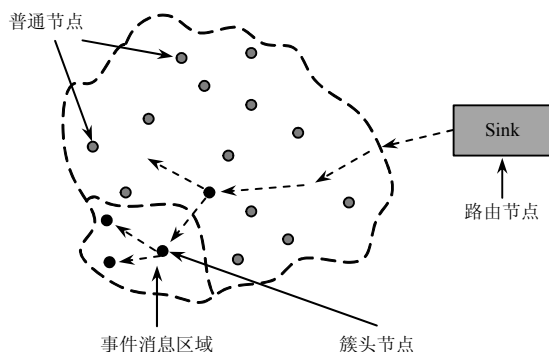


图 5-14 无线传感器网络节点分类

无线信号的频率需要与无线传感器网络中传输的数据信号的频率有所区分，这样无线唤醒信号可以很容易地与通信模块收/发的大量数据信号区别开。在无线唤醒机制中，节点的工作可以采用事件触发的形式，最大程度地提高能源利用率。当然也可以采用反查的方式由路由节点发起，唤醒指定的普通节点进行工作。

## 2) 模块构成

如果从硬件上来实现无线唤醒机制，则对无线传感器网络节点有以下四个突出要求。

(1) 无线传感器网络节点在增加了无线唤醒模块后、进入睡眠状态时，增加模块前和增加模块后消耗的电流不能相差太大。

(2) 无线传感器网络节点要能够被及时唤醒。在增加了无线唤醒功能后，节点在被唤醒工作的时候，需要很迅速地从睡眠状态转换到工作状态。

(3) 节点要能够对无线信号有足够的灵敏度，就是说节点需要能够及时地捕捉到无线唤醒信号。

(4) 当没有接收到无线唤醒信号的时候，节点不可以自己从睡眠状态转换到工作状态，必须且只能被指定的无线唤醒信号唤醒，而不可以被噪声“误”唤醒。

无线唤醒功能的实现主要靠无线唤醒模块来实现。无线唤醒机制的无线传感器网络节点如图 5-15 所示。在无线传感器网络节点结构中，唤醒模块主要是通过与微处理器模块中的控制器进行简单的数据传输和交换，从而判断节点是否该进入睡眠状态或高速工作状态。

节点中的各个模块，特别是通信模块等耗能较大的模块，在不需要数据采集或者其他工作的时候要尽可能地使它们进入低功耗的睡眠状态，是否唤醒去工作由微处理器模块发送指令进行控制。接收信号的部分电路在侦听唤醒信号的时候功耗极低，基本上不会对无线传感器网络节点的能耗造成太大的影响。

无线唤醒模块由两部分电路组成，它们分别负责射频信号的接收和发射。其中接收

信号电路需要随时做好接收电磁波的准备，以保证传感器节点的实时性。发射信号电路由于要消耗比较大的能量，在大部分时间内可以处于休眠状态，由微控制器来控制发射信号电路的工作。

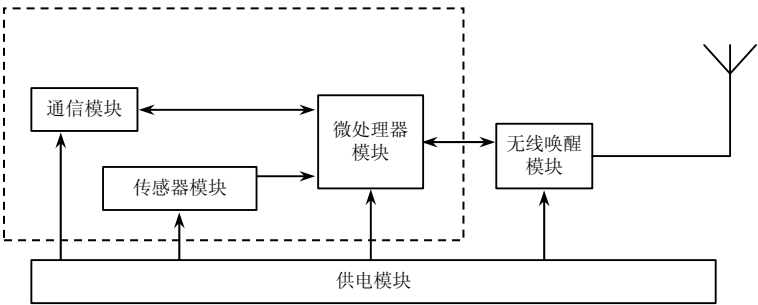


图 5-15 无线唤醒机制的无线传感器网络节点

3) 实现方法

在特定无线唤醒过程中，要利用的特定频率的射频无线电磁波信号（也称 RF 载波信号），是传输电能的物理媒体和传输数字信号的信息载体。普通节点和路由节点就是通过电磁波进行无线唤醒信号联络的，如图 5-16 所示。

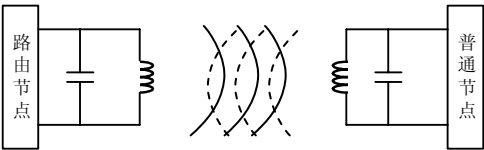


图 5-16 路由节点与普通节点之间通过无线电波通信

在普通节点和路由节点的无线唤醒模块中，有一个 LC 回路的固有谐振频率与发送或接收的无线唤醒信号的频率相同，这样当回路接收到一个频率相匹配的电磁波信号时，就会在回路中使谐振电容产生感应电荷，产生感应电动势。这个感应电动势经过放大、滤波等处理后，形成一个可以对微处理器模块进行中断的信号。通过微处理器对信息进行处理，并控制其他模块的工作状态转换。

微控制器可以采用中断的方式对工作模式进行选择和控制，使无线传感器网络节点在合适的睡眠模式下工作，体现无线传感器节点的无线唤醒功能。睡眠模式可以通过应用程序关闭微控制器中没有使用的模块，从而降低功耗。只有外部中断和复位时才可以唤醒单片机。在睡眠过程（除了空闲模式）中，I/O 时钟是停止的。通过电平方式触发中断，从而将微控制器从掉电模式唤醒时，需保证电平持续一定的时间，以降低微控制器对噪声的敏感程度。若信号出现过两次采样过程，但在启动过程结束之前就消失了，微控制器仍将是唤醒状态，但不再会引发中断。这里要求电平必须保持足够长的时间是使微控制器结束唤醒过程，然后触发电平中断信号。

无线唤醒模块通过天线从环境中搜集电磁波能量为微控制器提供中断信号，它在传感器节点中与微处理器模块联系最为紧密，其工作流程如图 5-17 所示。

无线唤醒模块将由接收电路和发射电路两部分组成。在初始状态下，接收信号电路和发射信号电路都处于休眠状态。当周围有特定频段的电磁波时，接收信号电路可以在很短的时间内由睡眠状态转到工作状态，判断数据序列是否正确，之后从环境中搜集电磁波能量，调整增益，产生一个中断信号。微控制器有几种不同的睡眠状态，在选择进入某种睡眠状态时，这个睡眠状态需要能够被中断信号唤醒。

当微控制器被唤醒后，由微控制器控制其他模块进入正常工作状态，采集数据并对转发的数据进行处理，判断传感器节点的通信模块是进入发送状态或者接收状态，同时也要判断是否需要通过无线唤醒模块的发送信号电路唤醒周围的节点进行数据转发。节点被唤醒后的工作流程如图 5-18 所示。

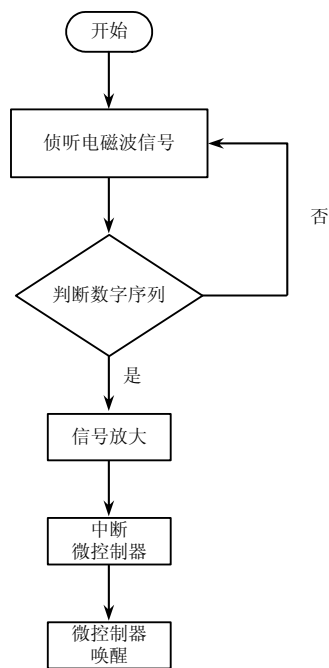


图 5-17 无线唤醒模块接收电磁波的工作流程

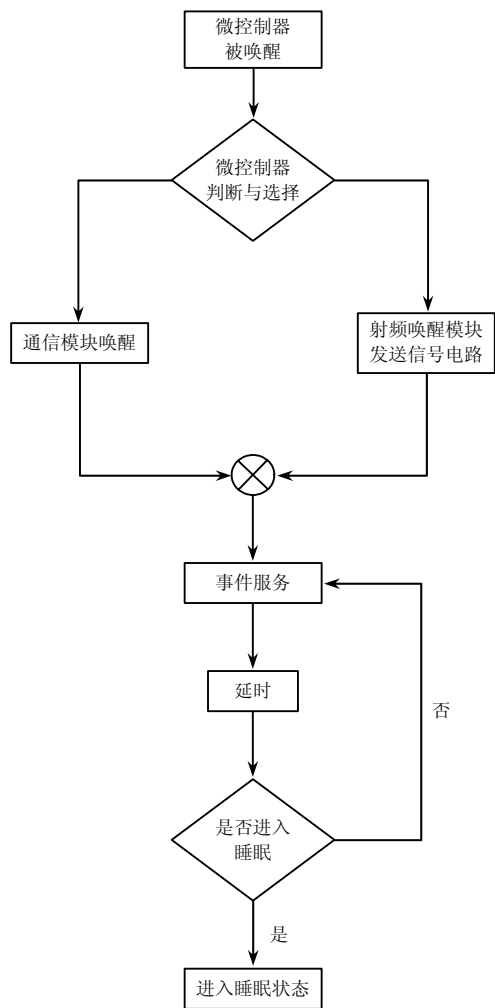


图 5-18 节点被唤醒后的工作流程

节点处理完事件之后, 经过一定的延时并根据特定的程序判断是否继续停留在工作状态, 如果还有事件, 则继续处理; 如果处理完, 启动休眠程序使节点的各个模块进入休眠状态, 等待下一次被唤醒。

#### 4) 多模式融合唤醒

在无线传感器网络中, 节点的供电电池能量有限。为了节省电池的功耗, 延长传感器节点的寿命, 除了在传感器节点电路中采用低功耗的元器件外, 主要依靠唤醒机制。在对无线传感器网络睡眠/唤醒机制的研究中, 同时存在着主动唤醒机制和无线唤醒机制, 可以根据实际需要将两者结合起来或采用其中的一种。

主动唤醒机制是在不对传感器节点硬件进行改动的情况下, 利用软件的形式对节点工作机制进行的一种改进, 它同样对无线传感器网络节省能源和延长寿命有非常大的促进。在定时唤醒机制中, 需要预先设定好一个节点工作状态的时刻表, 在节点睡眠状态下, 微处理器内部仍然有定时器保持工作, 到计时结束时产生一个中断信号, 唤醒传感器节点的微处理器, 此时节点开始全速运转采集环境中的数据或发送/接收数据。定时唤醒机制会带来下面三个问题:

(1) 设置的时间间隔。如果传感器节点主动唤醒的间隔过长, 在路由节点或者上级用户有采集数据的需求时, 节点可能会无法及时响应; 如果设置的时间过短, 传感器节点会被重复唤醒, 造成不必要的能量损失。

(2) 即使在事件发生之外的范围, 传感器节点也会无故被定时唤醒。

(3) 主动唤醒需要微处理器的时钟电路部分保持工作状态, 就是说微处理器不能进入最彻底的休眠状态。

显然只采用主动唤醒机制不能达到最佳的节能效果。但主动唤醒机制也有其优点, 比如说不需要对节点进行硬件上的改造等。在实时性要求不是很严格的区域, 完全可以采用定时唤醒的工作机制对事件进行监控和对数据进行处理。而在一些特殊区域, 完全可以采用主动唤醒与无线唤醒相结合的工作方式, 在对硬件进行改进的同时, 在软件的编写中使用定时时刻表的方法。在实时性比较强和功耗要求比较低的局部区域, 考虑到主动唤醒实时性不强的特点, 可以考虑用无线唤醒机制去处理事件信息。

在无线唤醒机制中, 亦可以形成节点之间相互唤醒和中心调度唤醒两种模式, 如图 5-19 所示。

节点间唤醒是指在目标将要离开某节点探测范围后, 该节点无线唤醒周围休眠的探测节点使之进入探测状态, 在后面的章节中, 这种模式是最常被使用的方法。中心调度模式是中心服务器端根据节点的区域, 按照调度规则唤醒区域内的节点, 无线传感器网络中的调度方法在第 4 章介绍。

这样在一个无线传感器网络系统中同时存在着多种工作机制, 或者可以在多种工作



机制之间选择,使传感器网络节点之间的组网更加灵活和方便。

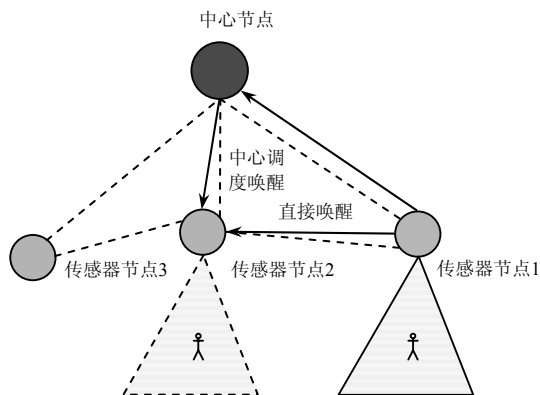


图 5-19 节点间唤醒和中心调度唤醒

## 5.2.2 联动探测技术

现代战争中,战争环境日趋复杂,敌我双方大量采用伪装、隐蔽、欺骗和干扰等手段来进行识别和反识别,仅仅依靠一种或少数几种探测手段难以对目标进行准确识别。为提高目标识别特别是对移动目标识别的准确性和可靠性,可以采用多类传感器进行联动协同探测,拓宽监视探测的时空覆盖范围,充分发挥各传感器的优势,提高目标识别率。此外,多传感器抗干扰的性能大大优于单个传感器,从而有效提升了系统的可靠性和容错性。本章从多传感器交叉指示和多传感器目标探测两个方面阐述联动探测技术。

### 1. 多传感器交叉指示

#### 1) 概念内涵

传感器的交叉指示是一个协作的处理过程,对共同的目标利用不同的传感器获取数据,即可利用一个传感器的观测或跟踪数据使另一个传感器指向目标,通过分析另一个传感器的探测信息来确认获取的目标和先前获取的目标是同一目标。一个传感器获取的信息可能被另外的传感器利用来达到更快的探测目的。以上对传感器交叉指示的描述表明其可以增强探测预警的准确性和及时性。当单个传感器探测到目标后指示其他传感器监视这个目标的区域,被动传感器指示主动传感器,以使主动传感器在需要的时候开启;低分辨率传感器指示高分辨率传感器,虚警率高的传感器指示虚警率低的传感器,以提供关于目标的高可靠性信息。传感器交叉指示有两种形式,一是传感器的交接,以确保大跨区目标平滑转换和跟踪误差的降低,二是通过另一个传感器来协助进行目标额外或更详细信息的获取。

一般来说,传感器交叉指示可以定义为:当一个传感器发现了潜在的目标时,会指

示其他传感器直接对该目标进行额外或更详细信息的获取,为信息融合提供必需的数据;同时又能够在目标稍纵即逝的情况下,要求其他传感器马上对这个可疑目标进行观测,以满足时间上的紧迫需求,即进行目标交接。交叉指示是传感器彼此之间互相指示,被指示的传感器也可能是发送指示的传感器,反之亦然。需要区分多传感器交叉指示与以下内容的关系。

(1) 与传感器管理的关系。交叉指示技术和传感器控制共同构成了传感器管理的内容,传感器交叉指示是传感器管理系统的一个重要组成部分。

(2) 与信息融合的关系。信息融合是集中式的,它把所有传感器发送来的信息进行融合得到一个较为精确的信息,所需信息量大,处理耗时长。传感器交叉指示是分散式的,在传感器数据丰富的环境下,通过控制数据获取过程有选择地获取传感器的信息,仅收集和存储那些真正需要的数据,从而使各传感器避免过量的数据存储和计算。同时,传感器交叉指示是更好地进行信息融合的技术基础,构成了信息融合系统的反馈环节,弥补了信息融合的不足,提高了传感器的利用率。由此看出,两者是相反又互补的关系。

(3) 与传感器指示交接的关系。多传感器交叉指示强调交叉,指示是对等的,传感器之间彼此互相指示,被指示者不必一定要对其做出响应,指示也可以分等级,等级越高的指示要求更快地响应,目的是更精确地探测、识别以及跟踪目标等。传感器指示交接是命令式的,被指示的要对其做出响应,目的是保证目标轨迹观测的连续性。传感器交叉指示广义上也包含了传感器的指示交接内容。

传感器交叉指示能减少融合所需的时间和资源,在很大程度上减少目标搜索分类的时间并减少关联/融合所必需的资源,可以降低对处理器的能力及通信的要求,提高了决策时间和数据融合系统的精度并增加态势感知,同时传感器交叉指示优化了传感器的信息覆盖和传感器平台之间的信息流动,从而可以更有效地搜索,增强检测效能。在传感器交叉指示过程中,传感器在需要时被开启,其余时刻处于休眠状态,既节省资源且提高了资源利用率,在出现稍纵即逝目标的情况下,可以要求其他传感器能够马上对这个可疑目标进行观测,以满足时间上的紧急信息需求。

当传感器网络中的一个传感器发现了潜在目标时,传感器(或融合中心)根据当前所获取目标的融合信息,判断是否需要传感器之间的交叉指示,其判断依赖下列两个准则:一是目标是否达到融合中心预先设置的期望性能指标(包括期望的目标探测概率、正确识别概率以及跟踪的精度等);二是目标是否还在当前传感器的探测、跟踪范围内。由此决定是否需要进行目标交接。此时,进行多传感器交叉指示的交接条件为:

(1) 目标即将离开当前传感器的跟踪区域;

(2) 另一个更高优先级的目标进入当前传感器的可跟踪区域,且当前传感器同时只能探测跟踪一个目标;

(3) 当前正在跟踪目标的传感器只有一个(如雷达),且由于某种原因(故障或受到反辐射导弹威胁必须关机)不能工作时,需要把目标交接给其他传感器。

因此,当信息量不足以达到期望的探测、识别、跟踪性能指标,以及需要对目标进行交接时,传感器之间进行交叉指示以获取更多、更详细的信息,从而对目标提高正确识别率及跟踪精度。

军事上,自动交叉指示的内容是目标信息等内容,它包含以下三方面内容。

(1) 所执行的具体任务(包括任务的类型,如探测、识别和跟踪,开始和结束时间,所探测的信息种类及精度);

(2) 发送指示信息的传感器平台位置信息(经纬度、高度或在某坐标系中的位置等);

(3) 发送指示信息的传感器所探测到的关于目标或可疑区域的信息(目标状态或身份的粗略估计或可疑区域的大致范围)。

## 2) 典型结构

多传感器交叉指示最佳的方式就是多智能体技术(Multi-Agent Technology, MAT),它也将成为交叉指示技术的发展趋势,即把探测网中的传感器看做一个智能体(Agent),单个传感器 Agent 可以单独执行任务,也可以与其他传感器 Agent 组成多 Agent 系统协作,共同完成任务,以解决单个传感器 Agent 不能解决的复杂问题,体现了传感器的自主性和协作性。把 MAT 应用于传感器的交叉指示中,必然对传感器管理结构及其作为反馈环节组成的信息融合系统结构提出了新的要求。下面给出基于 MAT 的多传感器协作管理结构和基于 MAT 的交叉指示信息融合结构两种典型结构。

### (1) 基于 MAT 的多传感器协作管理结构。

从地理位置上看,传感器在战场空间的分布兼具“集中性”和“分散性”,“集中性”是指传感器都是以作战平台为载体相对集中分布,且受本平台的控制和管理;“分散性”是指传感器分布在陆海空天的立体空间中,占据的总体空间范围大,通过战术信息网连接而构成庞大的传感器立体探测网。基于 MAT 构建的具有多传感器交叉指示功能的传感器协作管理结构如图 5-20 所示。

这里对作战平台采用两类 Agent: 传感器管理 Agent 和成员 Agent。传感器管理 Agent 一般由作战平台的指挥控制系统担任,它有双重职能: ① 根据指挥控制融合中心传感器管理的任务与其他平台的传感器管理 Agent 进行交互,实现作战平台之间的任务协同和交叉指示; ② 对平台内的传感器成员进行管理,即将平台作战任务进行分解,分配给本平台内的个体传感器成员,并对其任务执行过程进行监控,以及担当不同平台个体传感器进行通信协作的“桥梁”。成员 Agent 可以是单个传感器,也可以是传感器的组合,负责执行传感器管理 Agent 分配的任务,它们之间也可以通过通信协调实现作战平台内的任务协同和交叉指示。

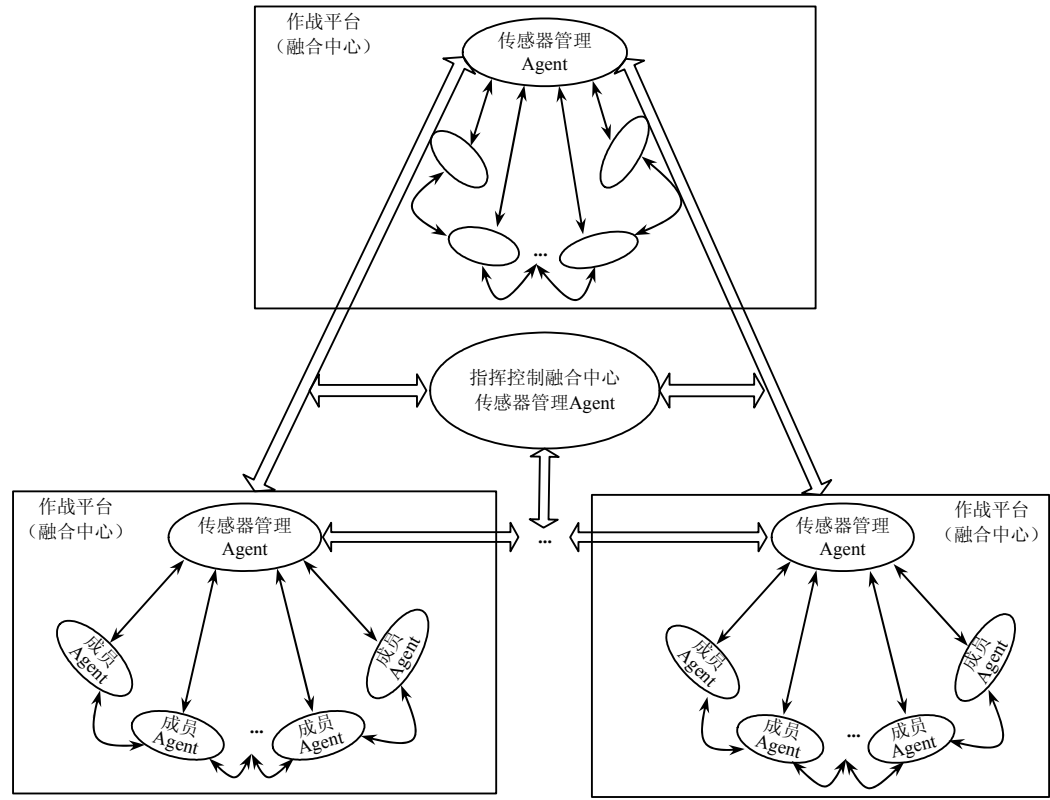


图 5-20 基于 MAT 的多传感器协作管理结构

(2) 基于 MAT 的交叉指示信息融合结构。

多传感器交叉指示的目的是为了更好地进行信息融合，是构成信息融合体系的重要反馈环节。一方面，信息融合中心可对各传感器获取的信息及其自身的状态信息进行分析、处理和融合，从而产生融合结果，确定所需执行的目标任务；另一方面，融合中心得出的关于任务的完成情况、还需执行的任务等可以作为驱动多传感器交叉指示的依据。MAT 支持构建具有交叉指示功能多传感器信息融合系统的需求，结合基于 MAT 的多传感器协作管理结构，构造基于 MAT 的多传感器交叉指示信息融合结构，如图 5-21 所示。

现将图 5-21 中有关 Agent 的功能及其运行机制说明如下。

(a) 平台融合中心 Agent。

- ① 从全局融合中心 Agent 获取各平台传感器 Agent 的地理位置、状态和能力等信息；
- ② 各平台融合中心 Agent 将下辖的各传感器的情况和能力（传感器工作是否正常、传感器的最大跟踪能力、最大跟踪距离和跟踪精度等）等信息提交给传感器管理 Agent；
- ③ 对各传感器 Agent 发送来的所有相关信息进行融合并进行局部态势和威胁估计；
- ④ 根据传感器管理 Agent 的需求，把融合后的目标估计信息作为传感器管理 Agent 优化传感器管理策略的依据；

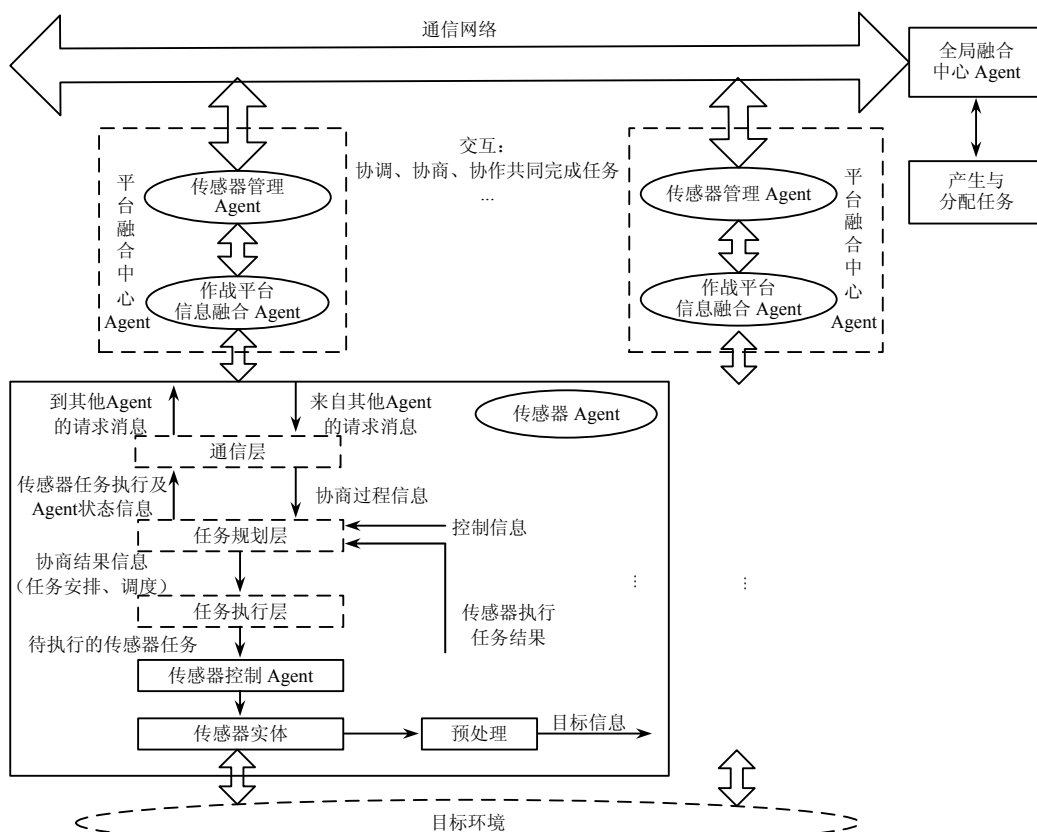


图 5-21 基于 MAT 的交叉指示信息融合结构

⑤ 根据传感器管理 Agent 的分配任务（传感器目标配对），对特定传感器组合的数据使用适当的融合策略进行融合估计；

⑥ 接受传感器 Agent 的请求，为传感器 Agent 提供其他传感器 Agent 的行为策略和其他相关资源以及融合结果。

(b) 全局融合中心 Agent。

① 存储及实时更新各平台传感器 Agent 的地理位置、状态和能力等信息，相当于一个传感器性能和配置的知识库；

② 对各平台融合中心 Agent 发送来的所有相关信息进行数据融合，并进行态势和威胁估计，以及产生和分配相应的目标任务；

③ 对系统任务的性能指标以及是否需要目标交接进行监控，以便确认所要求的总体性能指标是否达到和保证目标尽可能连续“可见”。

(c) 传感器管理 Agent。

① 接收传感器 Agent 不能完成的任务或需要协作完成的任务，以及协作的指示请求信息；

② 根据协作任务的请求获取平台下传感器 Agent 执行任务的现状和能力, 并提供给发出协作的传感器 Agent;

③ 根据平台/全局融合中心 Agent 的态势、威胁估计和信息需求确定下一个管理周期需要执行的任务清单(包括任务优先级和性能指标), 并对管理员根据战术需求输入的任务以及传感器 Agent 提出的请求任务进行管理, 并把任务传递给传感器平台下的单个传感器。

(d) 传感器 Agent。

传感器 Agent 的内部结构如图 5-21 所示, 它可以进行任务规划与对目标信息的获取, 并将测量数据传给平台融合中心 Agent。

① 任务规划层根据平台/全局融合中心 Agent、其他传感器 Agent 发送来的信息, 传感器管理 Agent 分配的任务和其优先级以及自身的能力状态, 确定在下一个传感器管理周期各传感器需完成的任务集及如何对其任务执行进行调度;

② 通信层通过规划层可了解传感器 Agent 完成任务的状态和能力, 只有那些能被该传感器 Agent 完成的任务(或把该任务分解成若干个子任务, 把可以执行的子任务交由此传感器 Agent 来执行)才被传送到规划层, 如果某些任务无法执行, 通信层将确定应该由其他传感器 Agent 协作执行的任务, 或者将结果通知给其他传感器 Agent;

③ 传感器 Agent 内部任务规划层和任务执行层之间的信息传送由通信层负责, 任务规划层发送其不能完成的任务和分解后的子任务(需要协作完成的任务), 以及协作的请求指示信息, 也接收来自本平台或其他平台传感器 Agent 及融合中心 Agent 的任务执行请求、通知、指示或结果信息, 同时任务规划层也支持分布式决策中的协商过程, 根据传感器 Agent 中的任务安排协商以怎样的调度形式完成指示的任务, 最后确定下一个管理周期内所要执行的传感器任务及其优先级;

④ 任务执行层的功能取决于传感器的类型及其完成传感器任务的能力。

(e) 传感器控制 Agent。

传感器控制 Agent 与传感器实体绑定, 用来直接驱动或控制所对应的资源, 负责把传感器任务协商方案转换为传感器可执行的命令, 同时还完成传感器的模式、参数选择等具体操作。

### 3) 案例分析

传感器交叉指示本质上是根据当前的信息, 通过期望行动获取额外信息或执行其他操作的过程。其中期望的行动就是系统所要执行的任务, 当前的信息就是当前所获取的关于目标信息及态势和威胁的评估结果, 所需的额外信息就是指示其他传感器获取额外的或更精确的目标信息, 最后信息融合中心通过融合多个传感器获取的目标信息来完成系统所要执行的任务。任务的产生、执行驱动着交叉指示过程的完成, 并贯穿于多传感

器交叉指示过程的始终。下面给出基于任务驱动的多传感器交叉指示典型案例，其过程示意图如图 5-22 所示。

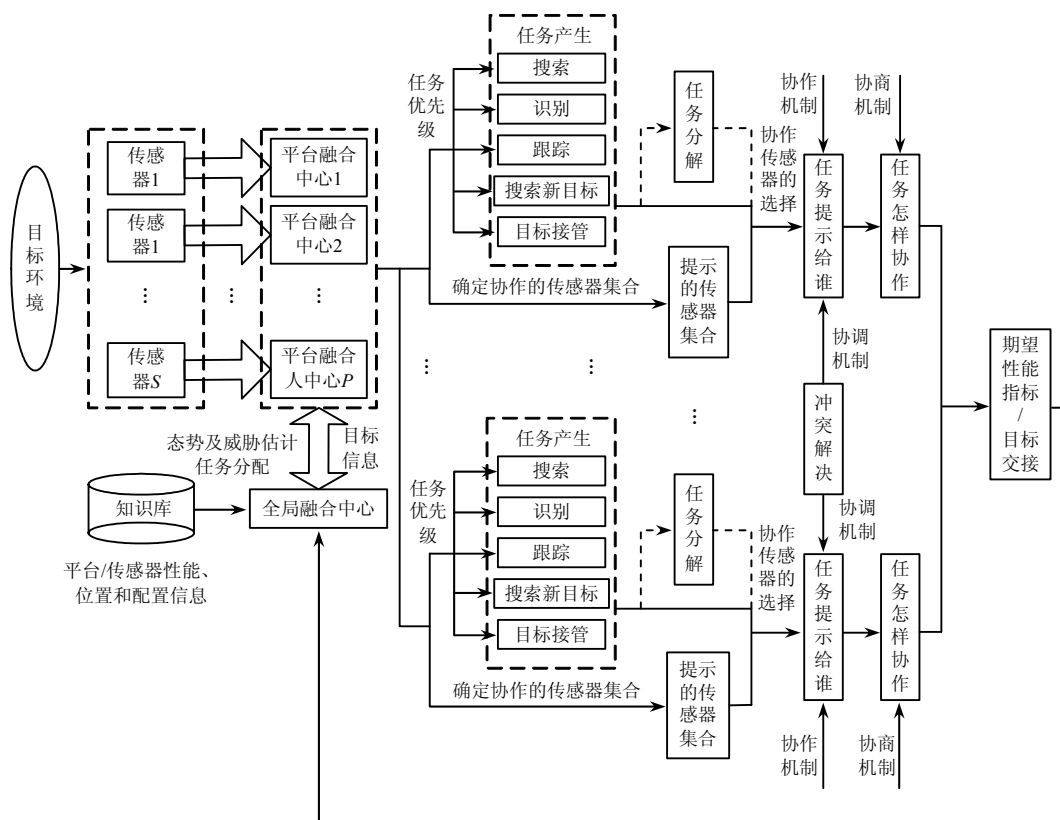


图 5-22 基于任务驱动的多传感器交叉指示过程示意图

首先，平台融合中心根据发现目标的传感器节点获得的关于目标身份和状态的粗略估计信息，全局融合中心预先存储的或实时侦察到的战场动态变化的传感器配置、位置、性能知识、态势和威胁评估结果，以及所要完成的目标任务性能等信息，确定当前时刻所需执行的任务，并根据相关信息将其分成两种：① 平台融合中心确定的或全局融合中心分配的，只需某个传感器就能够独立完成而不需要协作执行的任务或只能由某个传感器执行的任务，同时找出只能被某个传感器执行的，以及可以单独完成该任务的传感器集合；② 需要与其他传感器协作执行的目标任务，或把协作任务按照一定的原则、策略进行分解后需由其他传感器节点执行的子任务，同时为每个协作任务确定一个将能够执行这些任务的传感器集合。

其次，需要协作完成某些任务的传感器，直接（当距离较远时通过融合中心）给当前时刻某协作任务所确定的传感器集合中的所有传感器发送指示信息（任务或分解后的任务及相关信息），接收指示信息的传感器根据自己的性能和执行任务的情况，预测响应指示后协作执行任务的效益，随后发送指示信息的传感器根据某种协作和协调机制（当

需要协作的传感器资源冲突时的解决方法), 确定需要与集合中的哪个/些传感器进行协作, 即解决任务指示给谁的问题, 随即协作的传感器进行响应, 其他传感器则不响应协作。

再次, 发送指示信息的传感器与确定需要协作执行某些任务的传感器, 依据某种协商机制就任务情况, 在发送指示信息的传感器与响应指示信息的传感器之间进行协商, 即发送指示信息的传感器与响应指示信息的传感器根据自己的任务安排, 进行协作任务的调度, 以解决任务怎样协作执行的问题, 随即控制传感器的模式、工作参数和任务安排进行任务的执行。

最后, 各传感器把获取的传感器报告发送给全局融合中心进行融合, 计算是否满足任务要求的性能指标以及目标是否需要交接, 当不满足时, 继续产生任务与协作的传感器集合进行任务的协商和协作, 此过程是一个多次循环的指示过程, 直到满足下列条件之一时不再进行指示协作: ① 达到任务时限要求; ② 达到要求的性能指标; ③ 没有可以协作的传感器资源; ④ 目标任务完成的性能不再提高。该过程只需与相关的传感器资源进行协作, 不需要所有传感器的观测数据, 从而减少了信息的处理量, 同时降低了时处理器的能力及通信要求, 使传感器资源得到充分利用。

## 2. 多传感器目标探测

### 1) 动态机制

目标连续和高概率探测, 利用多传感器提供的多种测量数据, 进行优化、集成和综合处理, 主要研究的是融合算法, 较少涉及传感器资源的优化。通过传感器交叉指示技术进行目标的连续、高概率探测, 就是当一个传感器发现了潜在目标时, 进行一定的估计后, 指示其他传感器获取附加信息或更多详细信息, 即把多个传感器与独立的目标对应起来, 提供传感器到传感器的观测操作自动告警功能, 一方面指示其他传感器提前在目标来袭方向进行小范围搜索, 以增加探测距离, 保证目标尽可能连续“可见”, 以及目标丢失后能尽快重新锁定; 另一方面指示其他传感器协同探测以提高探测概率, 进而增加预警的准确性。其中指示哪些传感器参与目标探测涉及传感器资源的优化问题。

如前所述, 可将传感器立体探测网中的传感器看做智能体 (Agent), 传感器 Agent 可以单独执行任务, 也可以与其他传感器 Agent 协同执行任务。动态群组是传感器 Agent 为完成系统任务而进行的临时性合作, 其首先发现目标的传感器 Agent 发起动态群组的组建过程。传感器交叉指示多目标探测动态群组机制可分为群组组建、群组更新及群组解散三个阶段。

#### (1) 群组组建阶段。

某时刻  $\tau$ , 网络中的传感器节点探测到目标之后, 随机等待一段时间 (这是因为有某个传感器节点更早地发现了目标, 正在组建群组的过程中, 还没组建好; 可能又有另一个节点发现了该目标。为防止对同一目标形成多个群组, 所以要等待一段时间), 如果在



此期间没有收到来自其他节点组建群组的消息,则自己着手组建群组。首先发现目标的传感器节点(或融合中心)根据目标状态信息和存储的传感器节点等信息,计算能探测到该目标的传感器集合 $A$ 及沿目标运动方向即将能探测到该目标的传感器集合 $B$ ,将自己的ID和目标信息(编号、状态)等向集合 $A \cup B$ 发布,指示传感器集合 $B$ 中的传感器提前在目标来袭方向空域进行小范围搜索,并从传感器集合 $A$ 中针对不同目标分别选择相应的工作盟员,形成多个群组对多目标进行探测。指示传感器集合 $A$ 中的传感器协作和进行目标的探测将会消耗传感器的资源及时间。因此,要从传感器集合 $A$ 中选出一个子集 $A_1$ ,使探测概率和消耗代价等指标达到平衡优化。将集合 $A-A_1$ 以外的传感器设定为该目标的休眠传感器,这样在群组组建后,群组内的休眠传感器发现该目标时不再组建新的群组,从而防止多个群组探测同一个目标,同时计算群组的交集探测区域,即群组内所有工作盟员的共同探测区域。

### (2) 群组更新阶段。

当满足下列条件时,需要更新群组和形成新的群组。

① 当目标到达当前群组交集探测区域的缓冲区域以及即将离开时,让阶段(1)形成新的群组,以及利用传感器集合 $B$ 中的传感器进行小范围搜索,防止目标暂时“失明”或丢失后能尽快重新锁定,尽量保证目标探测任务的连续性。缓冲区域宽度的选择对动态群组的性能有很大影响。如果缓冲区域宽度过窄,群组更新可能尚未完成,目标就已飞出群组覆盖范围,导致探测任务的不连续及性能的降低;如果缓冲区域宽度过宽,则可能造成群组的更新过于频繁,从而浪费能量和网络资源。针对每个动态群组,其目标速度大小以及方向可能都不同,所以需针对每个目标的动态群组确定一个缓冲区域宽度。

② 当有新的传感器能探测到目标或当前群组中某些传感器失效时,把符合条件的新传感器加入到当前群组或从当前群组中移除失效的传感器,形成新的群组。

③ 若优先级高的目标进入优先级低的目标所在的传感器探测区域,以及该传感器同时只能探测一个目标时,即优先级高的目标竞争优先级低的目标的传感器资源时,则优先级低的目标所在的群组需要重新形成。

④ 当系统探测到新的目标时,按照阶段(1)形成新的群组。

### (3) 群组解散阶段。

如果目标被识别出是友方或已被摧毁,则上一时刻目标的动态群组(或融合中心)发出解散群组消息。

## 2) 模型建立

设定一个传感器—目标(任务)分配问题。假定时刻 $\tau$ ,某个传感器发现了 $n$ 个目标,符合条件的传感器集合 $A$ 共有 $m$ 个传感器,对每个目标分别产生一个动态群组来进行探测。一般来说,针对无线传感器网络的特点建立的对目标跟踪任务分配问题的模型,优化的是单目标函数且限制一个传感器只能同时跟踪一个目标,即只能同时加入一个动态

群组, 而笔者现在所讨论的传感器探测网络, 应可使该网络对所有目标的综合探测概率  $P$  最大、综合消耗代价  $C$  最小, 以及探测目标的传感器动态群组成员总数  $M$  最少。因此优化的是多个目标函数, 且一个传感器可同时探测多个目标, 同时也应考虑到目标的优先级, 则多传感器交叉指示多目标探测的动态群组模型可抽象为以下多目标优化问题。

目标函数为

$$\text{Max}(P) = \sum_{i_0}^n \omega_j [1 - \exp(\ln(1 - Pd_{i_0j})^{H_{i_0j}} \sum_{i_1 \neq i_0}^m \ln(1 - Pd_{i_0i_1}^{\text{cue}} Pd_{i_1j})^{H_{i_1j}})] \quad (5.36)$$

$$\text{Min}(C) = \alpha \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m C_{ij}^{\text{local}} H_{ij} + \beta \sum_{j=1}^n \sum_{i_0}^m C_{i_0i_1j}^{\text{com}} H_{i_1j} \quad (5.37)$$

式中,  $i_0$  是首先发现目标的传感器节点编号,  $\alpha$  和  $\beta$  为自身能量消耗及时间消耗的权重值。

$$\text{Min}(M) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m H_{ij} \quad (5.38)$$

其中,  $M_j = \sum_{i=1}^m H_{ij}$  为每个目标的动态群组成员总数, 满足  $1 \leq M_j \leq m$ , 即保证每个目标至少被一个传感器探测。

$$H_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 个传感器加入第 } j \text{ 个动态联盟} \\ 0 & \text{第 } i \text{ 个传感器不加入第 } j \text{ 个动态联盟} \end{cases} \quad \sum_{j=1}^m H_{ij} \leq Q_i \quad (5.39)$$

式中,  $Q_i$  为传感器  $i$  可同时探测目标的最大数量。令矩阵  $W = (\omega_j)_{1 \times n}$ , 矩阵中元素  $\omega_j$  为对目标  $j$  探测的归一化优先级权重。

优先级高对应的权重大, 保证在资源冲突下会有更多、更高探测概率的传感器节点倾向于探测优先级高的目标。

$Pd_{ij}$  是传感器  $i$  对目标  $j$  的探测概率。传感器探测概率与传感器到当前目标的距离、分辨率及各种干扰等因素有关。 $Pd_{i_0i_1}^{\text{cue}}$  为传感器  $i_0$  成功指示传感器  $i_1$  的概率。一个传感器成功指示另一个传感器的概率与目标的状态估计误差、从开始指示到指示结束这段时间内目标的状态变化及被指示传感器的视场等因素有关。

$C_{ij}^{\text{local}}$  为传感器  $i$  对目标  $j$  执行探测任务的自身能量消耗;  $C_{i_0i_1j}^{\text{com}}$  为传感器  $i_0$  指示传感器  $i_1$  探测目标  $j$  的时间消耗(包括通信时间和被指示传感器从接收到指示信息后探测到目标的时间)。

在建立所有目标的综合探测概率计算模型过程中, 假设第  $i_0$  个传感器发现了  $n$  个目标, 若符合条件的传感器集合中的  $m$  个传感器都执行对目标  $j$  的探测, 则对目标  $j$  的总探测概率  $P_1$  为

$$P_1 = 1 - (1 - Pd_{i_0j})(1 - Pd_{i_0i_1}^{\text{cue}} Pd_{i_1j})(1 - Pd_{i_0i_1}^{\text{cue}} Pd_{i_2j}) \cdots (1 - Pd_{i_0i_1}^{\text{cue}} Pd_{i_1j}) \cdots (1 - Pd_{i_0m}^{\text{cue}} Pd_{mj}) \quad (5.40)$$

式中,  $i_1 \neq i_0$ , 易知, 并非符合条件的传感器集合中的  $m$  个传感器都执行对目标  $j$  的探测, 若第  $i_1 (i_1=1, 2, \dots, m)$  个传感器加入对目标  $j$  探测的动态群组时, 则式 (5.40) 表达式中保留相应的括号项; 否则, 移除相应的括号项。对所有目标的综合探测概率  $P = \sum_{j=1}^n \omega_j P_j$ ,

考虑到模型中引入  $H_{ij}$  表示传感器  $i$  是否加入对目标  $j$  探测的动态群组, 也就是说, 用  $H_{ij}$  控制括号项是保留还是移除。由于  $H_{ij}$  的取值为 1 或 0, 任何数的 1 次幂都为其本身, 任何数的 0 次幂都为 1, 1 的对数为 0, 而且上式“乘积项”可以把对数运算变为“和运算”, 引入幂运算用  $H_{ij}$  控制传感器是否加入对目标的探测, 用指数运算将保留下来的括号项转换成乘积运算。则可根据这三种运算的特点巧妙地把所有目标的综合探测概率计算模型简化, 同时也便于编程计算。

### 3) 实现算法

#### (1) 改进粒子算法。

传感器交叉指示多目标探测动态群组模型的求解是一个离散型多目标分配的问题。Castanon 采用传感器分配的多目标动态规划解决方案, 无法解决组合爆炸的问题。针对无线传感器网络任务分配的问题, 人们给出了一种解决传感器动态群组求解问题的离散粒子群算法, 但是只形成一个动态群组执行任务功能, 不能针对每个目标进行传感器资源优化分配, 因此可以对该算法进行改进, 以解决对每个目标形成一个动态群组执行任务。改进算法中粒子的位置  $\mathbf{X}$  代表每个目标的动态群组组成方案, 可表示为

$$\mathbf{X} = (x_1^1, x_2^1, \dots, x_m^1, x_1^2, x_2^2, \dots, x_m^2, \dots, x_1^n, x_2^n, \dots, x_m^n) \quad (5.41)$$

式中,  $m$  表示传感器数,  $n$  表示目标 (任务) 数,  $1 \leq i \leq m$ ,  $1 \leq j \leq n$ ,  $x_i^j = \{0, 1\}$ , 矢量中元素  $x_i^j$  的值表示传感器  $i$  是否选择加入对目标  $j$  探测的动态群组, 0 表示不加入, 1 表示加入, 最后产生  $n$  个动态群组分别对目标进行探测。

#### (2) 适应度函数。

由模型可知, 可构造适应度函数表达式如下

$$f(\mathbf{X}) = \frac{C(\mathbf{X})}{C_{\max} - C_{\min}} + \frac{M(\mathbf{X})}{M_{\max} - M_{\min}} - \frac{P(\mathbf{X})}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (5.42)$$

式中,  $C_{\max}$  和  $C_{\min}$  为当前粒子群中执行任务消耗的最大值和最小值,  $M_{\max}$  和  $M_{\min}$  为当前粒子群中对应所有目标群组总数的最大值和最小值,  $P_{\max}$  和  $P_{\min}$  为当前粒子群中综合探测概率的最大值和最小值,  $P(\mathbf{X})$ 、 $M(\mathbf{X})$  和  $C(\mathbf{X})$  分别为粒子位置  $\mathbf{X}$  对应的综合探测概率和它所表示的所有目标群组总成员数及其执行任务的总消耗。

#### (3) 操作算子。

粒子的速度  $\mathbf{V}$  是粒子位置  $\mathbf{X}$  的改变值, 表示传感器加入和目标相关联动态群组的状态是否改变, 可具体表示为

$$V = (v_1^1, v_2^1, \dots, v_m^1, v_1^2, v_2^2, \dots, v_m^2, \dots, v_1^j, v_2^j, \dots, v_m^j, \dots, v_1^n, v_2^n, \dots, v_m^n) \quad (5.43)$$

式中,  $1 \leq i \leq m$ ,  $1 \leq j \leq n$ ,  $v_i^j = \{0, 1, 2\}$ , 若  $v_i^j = 2$ , 则表示第  $i$  个传感器加入动态群组  $j$  的状态未改变; 若不等于 2, 则相应把该传感器的状态改为  $v_i^j$ 。改进后的针对多目标探测问题的算法分布式更新方程为

$$X = X + c_1(X - P_b)c_2 \quad (5.44)$$

$$1 + (j-1)^* \quad m \leq c_1 \leq c_2 \leq j^* \quad j = 1:n \quad (5.45)$$

$$X = X + c_3(X - P_g)c_4 \quad (5.46)$$

$$1 + (j-1)^* \quad m \leq c_3 \leq c_4 \leq j^* \quad j = 1:n \quad (5.47)$$

在多目标探测中, 应分别对粒子位置  $X$  所对应的不同目标动态群组进行更新, 在每一次迭代中, 按照目标的随机顺序分别进行更新。其中  $P_b$ 、 $P_g$  分别为粒子位置历史最佳位置和全局最佳位置,  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  和  $c_4$  均为上式约束范围内的随机自然数。变异算子的引入可避免算法早熟, 保证个体多样性及群体多样性, 从而提高算法的全局收敛能力, 得到更优的解。

#### (4) 具体步骤。

针对多目标探测的多个动态群组求解问题, 改进算法的具体工作流程如下:

步骤 1: 随机产生每个粒子的初始位置和初始最佳位置;

步骤 2: 根据每个粒子的位置计算产生全局最佳位置;

步骤 3: 按粒子位置更新方程, 更新粒子位置;

步骤 4: 如果粒子当前位置比历史最佳位置好, 更新历史最佳位置;

步骤 5: 如果粒子当前位置比全局最佳位置好, 更新全局最佳位置;

步骤 6: 如果个体多样性低于某个阈值, 执行变异操作;

步骤 7: 如果群体多样性低于某个阈值, 对群体每个粒子执行变异操作;

步骤 8: 若满足条件, 则结束, 否则转到步骤 3。

其中, 要保证粒子对应每个目标的动态群组中至少有一个位置为 1, 以及所有目标动态群组的同一传感器的位置之和应小于传感器同时可探测的最大目标数, 因此在步骤 1、步骤 3、步骤 6、步骤 7 中记录传感器当前的最大探测容量, 若超过某传感器的最大探测能力, 则在下一个目标的动态群组形成、更新或变异操作中不考虑此传感器。

### 5.2.3 协同调度技术

在无能源限制的条件下, 一个给定的区域能够被覆盖这整个区域的传感器节点完全监控。但是, 由于各个节点能源有限, 监控质量与网络生命周期成为反比。在大多数情况下, 传感器节点的能源是不可再生的, 因此在目标的移动过程中, 如何选择一个最佳

的传感器节点子集作为下一时刻要启动的传感器节点，是延长网络生命周期和保证跟踪质量的关键，为此需要高效的协同调度技术，以延长网络的生命周期。

### 1. 技术理论基础

协同调度技术的理论基础是覆盖问题，覆盖问题是无线传感器网络中的重要问题之一。在一个大型的网络中，有大量的传感器节点以很大的密度分布在这个区域中，而每个传感器的能量是有限的，如果长期工作将会很快耗尽能量，并且传感器一般都工作在偏僻的或是敌对的环境中，比如说沙漠或是战场，这样更换传感器的电池几乎是一项不可能的工作。因此，需要高效的覆盖算法来指导传感器节点的部署以及节点的调度，使得在不影响整个系统性能的情况下，可以延长网络的生命周期。无线传感器网络一般具有高密度部署和节点能量受限的特点，通常采用工作节点密度控制算法和节点状态调度机制，以达到在保证覆盖的前提下减小能耗和延长网络寿命的目的。

覆盖问题中存在连接覆盖与感知覆盖两个覆盖率概念。连接覆盖是指每个在网络中的传感器在接收和发送数据时有一个范围，这个范围称为通信半径；连接性问题是指出在一个网络中用多少个节点来覆盖，以保证整个网络可以互相通信。当一个传感器节点可以与周围的邻居节点之间通信时，该节点就满足了连接性。感知覆盖是指每个传感器都可以感知周围的传感器，称这个感知范围为感知半径；覆盖性问题是指出在一个网络中用多少个节点可以保证整个网络的感知性，当一个传感器节点的感知范围能被周围的节点覆盖时，该节点就满足了感知覆盖性。

根据覆盖对象的不同，又可以将静态无线传感器网络的覆盖问题分为区域覆盖（area coverage）、点覆盖（point coverage）和栅栏覆盖（barrier coverage）三类。图 5-23（a）、图 5-23（b）和图 5-24 分别为目标覆盖、区域覆盖和栅栏覆盖示意图。目标覆盖考虑的

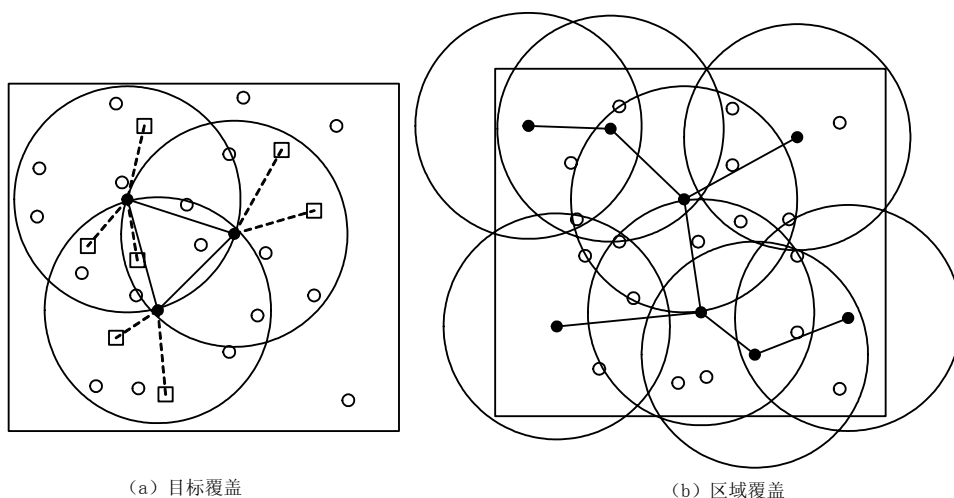


图 5-23 目标覆盖和区域覆盖示意图

是对若干离散目标点的覆盖；区域覆盖要求目标区域内的每个点至少被一个节点覆盖；栅栏覆盖关注网络对移动目标的检测能力，要求当某个移动目标沿任意路径穿越网络部署区域时，目标不被发现的概率最小。

在目标覆盖问题中，它关心的是覆盖目标区域中的一组点，因此只需对目标区域内的有限个离散点进行监测，并确定覆盖这些点所需的最少节点数及节点的位置。

区域覆盖是被研究的最多的覆盖问题，它要求目标区域中的每一点至少被一个节点覆盖，同时保证网络内各节点间的通信连通性，并在满足覆盖和连通要求的前提下，尽可能减少所需节点数，使网络成本最低。在如战场实时监控等应用中，就需要对目标区域内的每一个点进行监测。图 5-23 (b) 显示了传感器网络对给出的正方形区域进行覆盖的例子。

栅栏覆盖考虑的是当移动目标沿任意路径穿越无线传感器网络的部署区域时，网络检测到该移动目标的概率问题。该问题的意义在于，一方面可以确定最佳网络部署，使得目标检测概率最大；另一方面，当穿越敌方的监控区域时，可以选择一条最安全的路径。图 5-24 为栅栏覆盖示意图。

根据覆盖程度的不同，可以将无线传感器网络的覆盖问题分为单重覆盖和多重覆盖两种，其中多重覆盖问题又被称为  $k$ -覆盖问题。对于单重覆盖，传感器网络的覆盖问题可以简单地解释为：在监测区域中的每个位置至少位于一个传感器节点的感知范围以内。如果要求监测区域中的每一点至少被  $k$  个传感器所覆盖，则称为  $k$ -覆盖问题。图 5-25 所示为一个  $k$ -覆盖实例，其中目标 A 被三个传感器节点覆盖，因此  $k=3$ 。

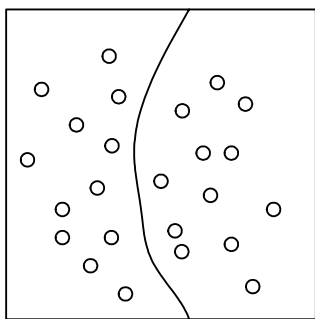


图 5-24 栅栏覆盖示意图

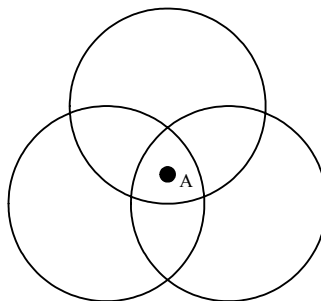


图 5-25  $k$ -覆盖案例

从以上的介绍中可以看出，目前提出的覆盖算法大多是静态算法，适用于静态无线传感器网络，而在目标跟踪应用中，需要在保证一定跟踪质量的前提下，实时动态地调度传感器节点，这对覆盖算法提出了更高的要求。传统的点覆盖和区域覆盖并不适用于目标跟踪应用中的动态调度，因此在后面章节提出了一种更加灵活的概率覆盖算法。

## 2. 目标区域预测

对于目标在下一个时刻可能的运动区域，可以采用近似的预测方法进行预测。尽管

精确预测目标的下一时刻位置非常困难,但是可以预测目标下一时刻可能的运动区域,也即是预测目标下一个位置的近似边界。已有文献表明,假设目标状态的变化服从高斯分布,则目标下一时刻的状态可用一个不确定性椭圆表示,如图 5-26 所示。不确定性椭圆的面积大小代表了估计或者预测的误差大小,因此某一时刻的不确定性椭圆区域可以近似为目标在当前的误差精度条件下可能的运动区域。

在实际的目标跟踪应用中,移动目标的状态变化并不一定服从高斯分布或者近似高斯分布,比如对野生动物的跟踪,动物的运动轨迹相当无规律性。这种情况下,基于卡尔曼滤波预测的节点调度策略往往会带来较大的误差,因为使用卡尔曼滤波预测的前提是目标的状态变化服从高斯分布。当目标的状态变化为非高斯分布时,可以采用保守的目标运动区域预测方法。首先,通过扩展卡尔曼滤波预测出目标下一个时刻可能的位置  $X^{t+1}$ ,则目标下一个时刻的可能运动区域用一个不确定圆来近似表示,圆心为预测的下一个时刻的目标位置,半径为  $r'=r+b$ ,其中  $r$  为传感器节点的感知半径,  $b$  为一个全局参数,它与整个传感器网络节点部署的密度有关,如果传感器节点之间的密度较大,则可以取一个较小的值(如  $b=r/4$ ),如果节点之间较稀疏,则  $b$  可以取一个稍大的值(如  $b=r/2$ ),如图 5-27 所示。

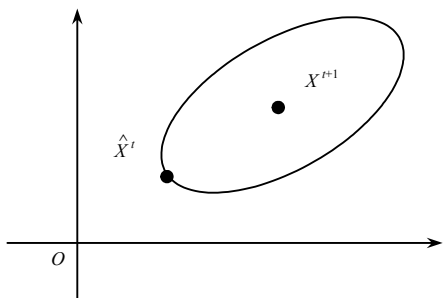


图 5-26 下一个状态的不确定性椭圆

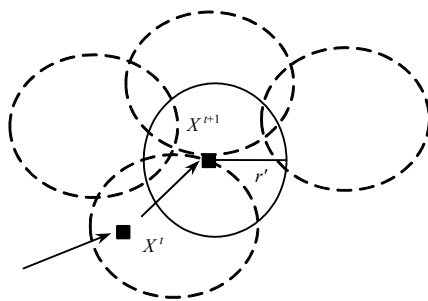


图 5-27 目标下一个时刻可能的运动区域

### 3. 动态区域覆盖

网络覆盖是设计目标跟踪应用必须考虑的一个重要问题。多数情况下,由于配置成本和物理条件的限制决定了对目标区域的覆盖多是部分覆盖。对于目标跟踪传感器网络,部分覆盖已经足够提供一定程度的跟踪质量保证。基于概率的动态非完全覆盖能够实现目标的动态区域覆盖,称为  $\alpha$ - $k$ -覆盖。 $\alpha$ - $k$ -覆盖可保证移动目标的运动区域至少被  $k$  个传感器节点以至少  $\alpha$  的概率所覆盖。通过基于概率的覆盖算法,覆盖这个椭圆区域的所有传感器节点成为候选传感器节点集合,因此一个候选传感器集合可以通过  $\alpha$ - $k$ -覆盖算法来确定。

假设目标在下一个时刻的状态预测区域是  $\bar{X}_{t+1}$ ,该椭圆区域的面积为  $s(\bar{X}_{t+1}) = s_{t+1}$ 。设椭圆区域  $\bar{X}_{t+1}$  被传感器节点  $S_i$  覆盖的面积为  $A_i$ ,即  $s(\bar{X}_{t+1} \cap \bar{s}_i) = A_i$ ,移动目标在下一

个时刻被传感器节点  $S_i$  覆盖的概率是  $P_i = s(\bar{X}_{t+1} \cap \bar{s}_i) / s(\bar{X}_{t+1}) = A_i / s_{t+1}$ 。如图 5-28 所示, 传感器节点  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  区域与目标下一时刻状态的椭圆区域的交集面积分别为  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$ , 则下一时刻的目标被三个传感器覆盖的概率为  $p_1 = A_1 / s_{t+1}$ ,  $p_2 = A_2 / s_{t+1}$ ,  $p_3 = A_3 / s_{t+1}$ , 显然  $P_1 < P_2 < P_3 = A_3 / s_{t+1}$ 。

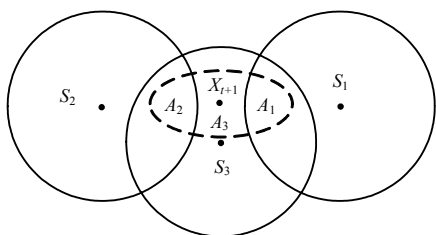


图 5-28  $\alpha$ -k-覆盖

给定一个概率值  $\alpha$  和一个目标运动区域  $\bar{X}_{t+1}$ , 在下一个时刻移动目标被传感器节点  $S_i$  覆盖的概率为  $P_i$ , 则下一时刻的候选传感器节点集合  $S = \{S_i \mid p_i \geq \alpha, i = 1, 2, \dots, k\}$ 。

(1) 当  $\alpha = 1$  时, 则下一时刻的预测区域完全被  $S$  中的  $k$  个传感器覆盖, 即区域  $\bar{X}_{t+1}$  满足  $k$ -覆盖 ( $k$ -coverage);

(2) 如果  $0 < \alpha < 1$ , 则称下一时刻的预测区域被  $S$  中的  $k$  个传感节点不完全覆盖, 即区域  $\bar{X}_{t+1}$  满足不完全  $k$ -覆盖, 即  $\alpha$ - $k$ -覆盖 ( $\alpha$ - $k$ -coverage)。

$\alpha$ - $k$ -覆盖反映了对区域覆盖两个方面的要求, 一是覆盖区域的传感器节点的个数, 即  $k$  值的大小, 在目标跟踪应用里需要至少 3 个传感器节点才可以定位目标。

因为如果少于 3 个传感器节点参与跟踪, 则很难对目标进行定位。这里调度机制假设在传感器节点的部署阶段, 按照一定密度需求进行节点部署。稀疏部署的传感器网络不在算法考虑范围内。因此  $k$  最小值应为 3。

其次是覆盖度  $\alpha$ , 概率  $\alpha$  反映了对区域的覆盖程度: ① 当概率  $\alpha$  取值很小时, 对预测区域覆盖概率很小的传感器节点都会被选为候选传感器节点, 这时候选入的传感器节点非常多,  $k$  的值相应增大, 更多的传感器节点会被选中进入跟踪状态, 跟踪质量相应提高, 但是将消耗更多的网络能量; ② 当概率  $\alpha$  取值很大时, 甚至  $\alpha$  接近于 1 时, 覆盖几乎成为完全覆盖, 意味着对预测运动区域接近完全覆盖的传感器节点才会被选为候选传感器节点, 这时符合要求的传感器节点较少,  $k$  的值相应减小, 更少的传感器节点进入跟踪状态, 节省了网络能量, 但是跟踪质量降低。

在传感器节点的调度过程中,  $\alpha$  值的变化直接影响最终的目标跟踪质量。只有当概率  $\alpha$  增至为某个合适的值时, 同时  $k$  值也取得一个相应的合适值, 则通过  $\alpha$ - $k$ -覆盖算法确定的候选传感器节点集合才接近于最优的传感器节点子集, 这时候跟踪质量和网络的生命周期会达到一个平衡。

#### 4. 协同调度的实现

在目标跟踪应用中, 如何选择一个最优的传感器节点子集, 在指定时刻被唤醒, 实时跟踪目标是延长网络生命周期和保证跟踪质量的关键, 基于能量模型的传感器节点调度机制, 可以分为以下四个步骤。



- (1) 预测目标在下一个时刻 ( $t+1$ ) 可能的运动区域  $\bar{X}_{t+1}$ ;
- (2) 用  $\alpha$ -k-覆盖算法确定覆盖目标区域  $\bar{X}_{t+1}$  的候选传感器节点集合, 即  $S = \{s_i | p_i \geq a, i=1, 2, \dots, N\}$ ;
- (3) 以最小通信代价为目标, 从候选传感器节点集合  $S$  中选择一个最优的传感器节点子集  $S'$ ;
- (4) 通告传感器节点子集  $S'$  中所有节点进入跟踪状态, 并利用任播 (Anycast) 路由技术来优化中心节点的选取和信息查询。

这种机制的目的是调度一部分传感器节点使其处于活跃状态, 使得移动目标可以被持续跟踪到并使网络生命周期最大化。下面将具体阐述高效的传感器节点调度策略, 从能量的消耗模型着手深入分析调度策略。

#### 1) 能量消耗模型

传感器节点消耗能量的模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块。随着集成电路工艺的进步, 处理器和传感器的功耗变得很低, 绝大部分能量消耗在无线通信模块上。无线通信模块在空闲状态时一直监听无线信道的使用情况, 检查是否有数据发送给自己, 而睡眠状态时通信模块则关闭。无线通信模块在发送状态时的能量消耗最大, 在空闲状态和接收状态时的能量消耗接近, 略小于发送状态的能量消耗, 在睡眠状态的能量消耗最少。如何让网络通信更有效, 减少不必要的转发和接收, 不需要通信时尽快进入睡眠状态, 是传感器网络协议设计需要重点考虑的问题。

传感器节点节省能量的主要方式是休眠机制。当节点目前没有探测任务并且不需要为其他节点转发数据时, 休眠机制会关闭节点的无线通信模块、数据采集模块甚至计算模块以节省能量。当任务来临时, 只有与任务发生区域相邻的传感器节点处于活动状态, 从而形成一个活动区域。活动区域随着数据向网关节点的传送而移动, 这样原先活动的节点在活动区域离开后可以转入休眠模式从而节省能量。活动区域示意图如图 5-29 所示。

在目标跟踪的过程中, 大量的数据融合带来的通信以及目标的探测都需消耗能量, 这对传感器节点的能量供应提出了很高的要求。在同一个传感器网络中, 不同节点对能量的需求和使用都会有不同。例如, 靠近基站 (Sink) 的节点可能需要更多地能量用在转发数据包上, 而整个网络的边缘节点会将主要能量用在收集传感器数据上。因此, 有些节点消耗能量比较快, 成为整个网络的能量瓶颈。在实际应用中, 需要预测能量可能消耗较快的节点, 并采取一定的冗余措施以保证数据传输不会因为个别节点失效而中断。因此, 需要一种高效的调度机制来调度传感器节点, 尽可能使冗余传感器节点在合适的时候进入睡眠状态, 并且尽量提高节点的利用率。为了研究高效的调度算法, 需要建立能量消耗模型来模拟传感器节点的能量消耗行为。

传感器节点的能量主要消耗在数据的计算处理、信号的发送接收和收上。后者的能量

消耗比最大,且经常是距离的函数。根据节点传输、接收、侦听和睡眠的四种状态,相应的能量消耗也可以分为四种状态。一般来说,侦听所需要的能量和传输与接收所消耗的能量差不多,而睡眠状态的节点所消耗的能量比在接收状态下小1~4个数量级。例如,对Mica2 Mote传感器来说,这些能量级别分别是:传输状态消耗81mW,接收状态和侦听状态消耗分别为30mW,睡眠状态消耗0.003mW。因此,不是处于通信忙碌状态的节点应该尽可能多的处于睡眠状态。

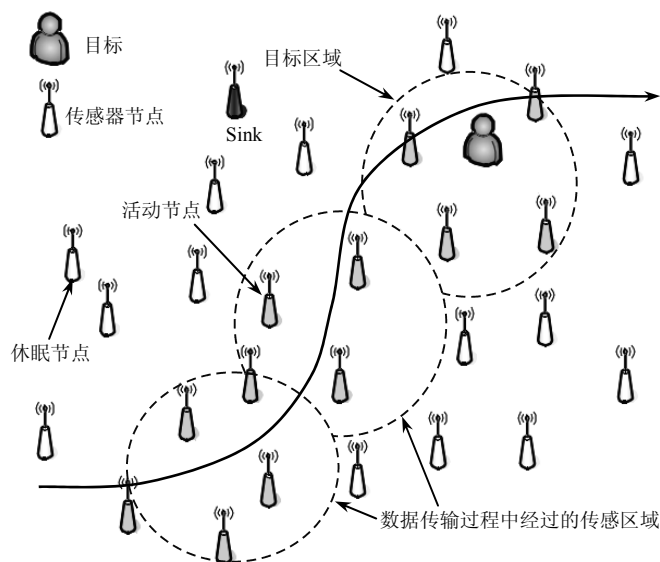


图 5-29 活动区域示意图

为了建立传感器节点调度模型,本节假设传感器节点的平均能量消耗率可以测量。在实际环境中,对特定的硬件来说,节点的能量消耗率是可以通过硬件测量出来的。本节提出如下能量消耗模型。

定义  $l_i$  为节点  $i$  与目标之间的距离,  $\lambda_l (J/s \times m)$  为单位时间内测量单位距离所消耗的能量,  $e_l$  为每单位时间用于测距感应所消耗的能量, 则  $e_l = \lambda_l l_i$ 。

定义  $A_i$  为节点  $i$  的邻居节点集合,  $|A_i|$  为节点  $i$  的邻居节点个数,  $d_{ij}$  为节点  $i$  和节点  $j$  之间的距离,  $\lambda_t (J/S \times M)$  为单位时间内单位距离通信所消耗的能量,  $e_t$  为每单位时间内节点与邻居节点通信所消耗的平均能量, 则  $e_t = \frac{\lambda_t}{|A_i|} \sum_j d_{ij}$  定义节点  $i$  的平均能量消耗率为  $w_i$ , 即  $w_i = e_p + e_l + e_t = e_p + \lambda_l l_i + \frac{\lambda_t}{|A_i|} \sum_j d_{ij}$ 。

上式中,  $e_p$  是每单位时间内处理数据所消耗的能量, 参数  $\lambda_l$  和  $\lambda_t$  大多依赖于传感器的自身的特点。这里假设  $\lambda_l$  和  $\lambda_t$  为已知的常量, 假设节点  $i$  的初始能量为  $E_i$ , 节点  $i$  的生命周期定义为初始能量  $E_i$  耗尽所花费的期望时间, 即  $T_i = E_i / w_i$ , 其中  $w_i$  由上式给定。

## 2) 最优协作调度

选择下一个时刻的跟踪节点需要考率该节点的通信能量消耗、该节点获取目标位置信息的能量消耗及该节点处理所收到信息时的能量消耗。这三部分能量消耗分别是通信能量消耗、探测能量消耗和计算能量消耗，其中通信能量消耗所占比例最大。一般来说，与目标距离越近，具有相同传感器的节点消耗将越小。因此跟踪节点应选择令估计目标位置不确定性椭圆面积减少最多的邻居节点作为下一个跟踪节点，能以较小的能量消耗来提高估计目标位置的准确性。

基于概率覆盖的目标跟踪方法在保证跟踪精度的同时尽量减少由于节点不必要通信带来的能量消耗。衡量节点间的不确定性是估计一个节点是否能够增加侦测精度的一种可行方法。而在考虑节点跟踪精度的同时也要考虑节点间的能量消耗。如何更好地结合这两个因素是目标跟踪中的一个重要问题。由于节点能够智能地决定后继跟踪节点，所以基于概率覆盖的跟踪方法能够大幅度减少参加跟踪活动的节点数量，从而减少整个网络的能量消耗。

通过  $\alpha$ -k-覆盖确定了下一个时刻需要启动的候选传感器节点集合后，下一步是从所选的候选传感器节点集合中选择一个最优的传感器节点子集在下一时刻启动。在选择一个传感器节点子集时，为了平衡跟踪质量和网络生命周期，不仅需要考虑单个节点的能量消耗情况，同时需要考虑哪些传感器节点在一起协作会更加节省能量，并带来更好的跟踪精度，即在同时考虑通信代价和节点的有效性的情况下，从候选传感器节点集合中选择一个最佳的传感器节点子集，作为下一个时刻要唤醒的传感器节点，目的是保证一定的跟踪质量的同时，消耗最小的传输能量。最优传感器节点子集选择示意图如图 5-30 所示。如图可见，A 区域为当前的活动区域，已经对移动目标进行了定位，B 区域的所有传感器节点组成下一时刻的候选传感器节点子集，C 区域的所有传感器节点为下一时刻需要启动的最优的传感器节点子集。

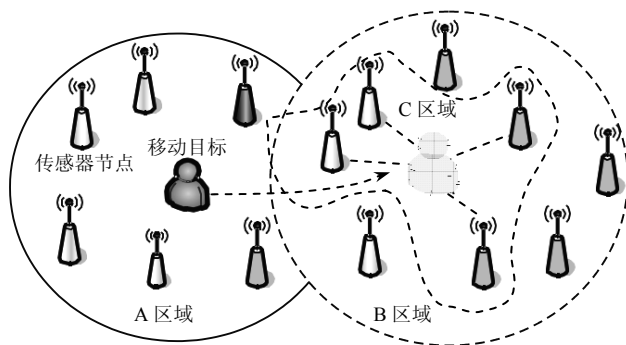


图 5-30 最优传感器节点子集选择示意图

下面定义最优协作调度问题（Optimal Cooperation Scheduling Problem, OCSP）：对于

任意的在第  $k$  个时间步长内传感器调度策略  $P_k$ , 有  $N$  维向量  $\mathbf{X}^{P_k} = (X_1^{P_k}, X_2^{P_k}, \dots, X_N^{P_k})$ , 如果  $P_k$  是最优的调整策略, 当且仅当  $\mathbf{X}^{P_k} = (X_1^{P_k}, X_2^{P_k}, \dots, X_N^{P_k})$  是下面问题的解。

假定在第  $k$  个时间步长内的候选传感器节点集合为

$$S_k = \{s_i \mid p_i \geq a, i=1, 2, \dots, N\} \quad (5.48)$$

节点  $s_i$  在第  $k$  个时间步长内的平均能量消耗率为  $w_{i,k}$ , 其中任意  $S_i \in S_k$ 。每个时间间隔  $t$  内消耗的最低能量消耗量为  $E$ 。

在第  $i$  个时间步长内选择的最佳的传感器节点子集为  $S'_k$ , 其中  $S'_k \subseteq S_k$ 。

$X_i$  为布尔变量,  $i=1, 2, \dots, N$ ;  $X_i=1$  仅当传感器节点  $S_i \in S_k$ , 否则  $X_i=0$ 。

为了用数学模型形式化该问题, 这里定义传感器节点  $i$  在第  $k$  个时间步长的通信代价函数为

$$C(i, k) = \beta x_{i,k} l_i + (1 - \beta) g(x_i) \quad (5.49)$$

式中, 当且仅当  $x_i = 1$  时,  $g(x_i) = \frac{1}{\sum_{j \neq i}^N (x_i x_j) d_{ij}}$ ; 否则  $g(x_i) = 0$ 。  $l_i$  为传感器节点  $i$  与目标位置之间的距离,  $\beta x_{i,k} l_i$  为用于测量节点  $i$  与目标之间距离所消耗的能量,  $(1 - \beta) g(x_i)$  为用于测量距离的能量消耗的比率, 为活跃节点  $i$  与邻居节点的平均通信代价。因此, 在时间步长  $S_k$  内候选传感器节点集合中所有节点的总通信代价函数为

$$f(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N C(i, k) \quad (5.50)$$

由于对任意一个调度策略都有  $N$  个未知数  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , 且任意一个未知数的值只能为 0 和 1, 所以最多有  $2^N$  个调度策略, 相应的代价函数也有  $2^N$  个,  $f_j(x_1, x_2, \dots, x_N)$  为第  $j$  个候选调度策略的值, 其  $j=1, 2, \dots, 2^N$ 。

因此, 最优协作调度问题可以形式为如下优化问题, 即

$$\min_j f_j(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad j=1, 2, \dots, 2^N$$

$$(E_{i,k} - w_{i,k} t) x_i \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, N$$

$$St \sum_{i=1}^N E_{i,k} x_i \geq E$$

$$\sum_{i=1}^N x_i \geq 3$$

式中,  $x_i=0$  或  $x_i=1$ 。

说明:

(1) 限制条件  $(E_{i,k} - w_{i,k} t) x_i \geq 0$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ), 用于保证传感器节点  $S_i$  在  $K$  时刻的剩余量  $E_{i,k}$  能够足够完成下一时间步长的跟踪任务。

(2) 限制条件  $\sum_{i=1}^N E_{i,k} x_i \geq E$  保证选择的传感器节点总的剩余能量不少于能量限制  $E$ 。根据能量消耗模型, 联合不同的传感器节点对目标进行协作跟踪会导致不同的能量消耗

结果。因此, 需要一个总的能量限制来约束调度算法, 使得合适的传感器节点能够被选中。

(3) 限制条件  $\sum_{i=1}^N x_i \geq 3$  保证至少有三个传感器节点被选中。因为如果少于三个传感器节点参与跟踪, 则很难对目标进行定位。这里调度机制假设在传感器节点的部署阶段, 按照一定密度需求进行节点部署。稀疏部署的传感器网络不在算法考虑范围内。该优化问题是一个非线性的整数规划问题。众所周知, 线性整数规划问题的算法具有指数复杂性, 而非线性整数规划问题的求解则更为困难。传感器网络中传感器通常都具有嵌入式处理器和存储器, 具有计算能力, 但是处理器性能、存储器容量和能源都很有限, 由此导致传感器的计算能力十分有限。每个传感器仅具有有限的存储器和计算资源, 难以处理复杂度很高的计算任务, 而且在目标跟踪过程中, 对节点的调度需要实时性, 节点即使具备了相当的计算能力, 也需要在很短时间内完成计算任务, 这对内存和计算能力都非常有限的传感器网络节点来说是难以完成的。因此, 常规的对非线性整数规划问题的求解方法不适合资源受限的传感器节点。针对以上问题, 本文提出了一种基于贪婪算法的启发式近似算法, 通过寻找尽可能大的可行解, 从而求出近似最优解。

## 5.2.4 目标跟踪技术

在一些目标运动线路复杂, 运动速度较快或者对跟踪精度要求很高的场合, 单节点模式就不能满足跟踪精度要求。无线传感器网络中目标跟踪的实质是节点间相互协同的过程, 多任务节点协同能在资源受限的条件下, 得到比单个节点独立跟踪获得更加精确的结果。考虑到运动模型的非线性和随机性, 可以采用多传感器交互多模型滤波器, 对多模型切换混合系统的机动目标进行有效跟踪, 最终形成如图 5-31 所示的多感知远程协同目标跟踪示意图。

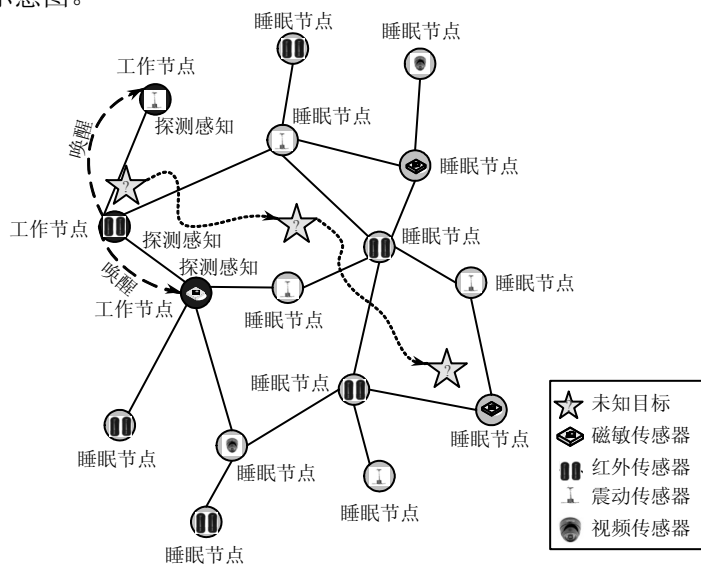


图 5-31 多感知远程协同目标跟踪示意图

传统的目标跟踪基本都是单节点跟踪算法, 每一时刻都只有一个传感器节点参与工作, 包括测量、计算或通信等, 这种调度算法虽然减少了通信工作量, 节约了一部分能量, 但是其代价是差强人意的跟踪精度。在一些目标运动线路复杂, 运动速度较快或者对跟踪精度要求很高的场合, 单节点模式就不能满足跟踪精度要求。无线传感器网络中目标跟踪的实质是节点间相互协同的过程, 经验证, 多任务节点协同能在资源受限的条件下得到比单个节点独立跟踪获得更加精确的结果。目前流行的多传感器协同跟踪方法主要是动态局部集中式算法, 它通过多传感器任务节点组成分簇、协同工作的策略。然而目前的多传感器调度算法主要考虑的是节点簇重构的原则和步骤实现等问题, 很少考虑传感器网络中能量均衡分布问题。事实上, 能量均衡分布对于实际应用非常重要, 如果单个传感器节点总是作为任务节点, 就会造成这个节点的能量迅速耗尽, 变成死节点, 这对于形成分簇拓扑结构是不利的。

若能够根据目标的移动位置, 动态地唤醒无线传感器网络中部分传感器节点形成分簇, 并选择合适的簇首和采样间隔进行目标跟踪, 通过协作感知以及测量信息融合, 提高跟踪精度, 同时节约通信能量和计算资源, 均衡能量分配, 提高网络的可靠性, 是至关重要的。这里阐述的目标跟踪技术采取预测机制, 并考虑到运动模型的非线性和随机性, 采用多传感器交互多模型 (Interactive multiple model, IMM) 滤波器, 对机动目标进行有效的跟踪。

### 1. 机动目标测量模型

在目标跟踪中, 由于目标移动的机动性, 不可能用某一种运动模型去描述目标的移动, 因此机动目标通常建模为具有模型切换的混合系统, 即

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}_{k-1}(\mathbf{x}_{k-1}, r_k, \Delta t_k) + \mathbf{w}_{k-1}(r_k) \quad (5.51)$$

式中,  $\mathbf{x}_k$  为机动目标状态,  $\mathbf{w}_{k-1}(r_k)$  为过程噪声;  $r_k$  为离散模型, 服从一阶齐次 Markov 链, 描述目标运动模型的集合空间  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_N\}$ , 初始概率分布  $\mu_0^i = P_r\{r_0 = M^i\}$ , 转移概率  $P_k^{ij} = p_r\{r_k = M^j \mid r_{k-1} = M^i\}$ 。  $\Delta t_k$  是该时刻的采样间隔。假设有  $n$  个传感器节点  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , 获得的测量信息为  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ , 那么测量模型为

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} z_k^1 \\ z_k^2 \\ \vdots \\ z_k^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{x}_k) \\ h_2(\mathbf{x}_k) \\ \vdots \\ h_n(\mathbf{x}_k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_k^1 \\ v_k^2 \\ \vdots \\ v_k^n \end{bmatrix} = \mathbf{H}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{V}_k \quad (5.52)$$

式中,  $h_j$  是传感器  $s_j$  的测量函数,  $v_k^j$  是它的测量噪声,  $\mathbf{w}_k$  和  $\mathbf{v}_k$  是相互独立的零均值白噪声, 其协方差矩阵分别为  $\mathbf{Q}_k$  和  $\mathbf{R}_k$ 。本节中考虑常速度模型和协调转弯模型两种运动模型。

对于常速度模型有

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}_1(\Delta t_k)\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (5.53)$$

状态  $\mathbf{x}_k = (x_k^p, y_k^p, \dot{x}_k^p, \dot{y}_k^p)$ , 其中  $x_k^p$  和  $y_k^p$  是目标的  $x$  轴和  $y$  轴坐标。 $\dot{x}_k^p$  和  $\dot{y}_k^p$  是目标在  $x$  轴和  $y$  轴方向上速度。其状态转移矩阵为

$$\mathbf{F}_1(\Delta t_k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t_k & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t_k \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.54)$$

噪声协方差矩阵为

$$\mathbf{Q}(\Delta t_k) = q \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \Delta t_k^3 & 0 & \frac{1}{2} \Delta t_k^2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} \Delta t_k^3 & 0 & \frac{1}{2} \Delta t_k^2 \\ \frac{1}{2} \Delta t_k^2 & 0 & \Delta t_k & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \Delta t_k^2 & 0 & \Delta t_k \end{bmatrix} \quad (5.55)$$

式中,  $q$  是过程噪声的强度。

对于协调转弯模型, 有

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}_2(\Delta t_k) \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (5.56)$$

状态  $\mathbf{x}_k = (x_k^p, y_k^p, \dot{x}_k^p, \dot{y}_k^p, \omega_k)$ , 其中  $\omega_k$  为转弯度。其状态转移矩阵为

$$\mathbf{F}_2(\Delta t_k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{\sin(\omega_{k-1} \Delta t_k)}{\omega_{k-1}} & \frac{\cos(\omega_{k-1} \Delta t_k)}{\omega_k} & 0 \\ 0 & 1 & \frac{\cos(\omega_{k-1} \Delta t_k)}{\omega_k} & \frac{\sin(\omega_{k-1} \Delta t_k)}{\omega_{k-1}} & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\omega_{k-1} \Delta t_k) & -\sin(\omega_{k-1} \Delta t_k) & 0 \\ 0 & 0 & \sin(\omega_{k-1} \Delta t_k) & \cos(\omega_{k-1} \Delta t_k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.57)$$

这是一个非线性运动模型, 进行状态估计时, 需要计算其雅克比矩阵, 结果为

$$\mathbf{F}_{2, \mathbf{x}_{k-1}}(\Delta t_k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{\sin(\omega_{k-1} \Delta t_k)}{\omega_{k-1}} & \frac{\cos(\omega_{k-1} \Delta t_k) - 1}{\omega_k} & \frac{\partial x_{k-1}^p}{\partial \omega_{k-1}} \\ 0 & 1 & \frac{\cos(\omega_{k-1} \Delta t_k) - 1}{\omega_{k-1}} & \frac{\sin(\omega_{k-1} \Delta t_k)}{\omega_{k-1}} & \frac{\partial y_{k-1}^p}{\partial \omega_{k-1}} \\ 0 & 0 & \cos(\omega_{k-1} \Delta t_k) & -\sin(\omega_{k-1} \Delta t_k) & \frac{\partial \dot{x}_{k-1}^p}{\partial \omega_{k-1}} \\ 0 & 0 & \sin(\omega_{k-1} \Delta t_k) & \cos(\omega_{k-1} \Delta t_k) & \frac{\partial \dot{y}_{k-1}^p}{\partial \omega_{k-1}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.58)$$

式中

$$\begin{aligned}\frac{\partial \dot{x}_{k-1}^p}{\partial \omega_{k-1}} &= \frac{\omega_{k-1} \Delta t_k \cos(\omega_{k-1} \Delta t_k) - \sin(\omega_{k-1} \Delta t_k)}{\omega_{k-1}^2} \dot{x}_{k-1}^p - \frac{\omega_{k-1} \Delta t_k \sin(\omega_{k-1} \Delta t_k) + \cos(\omega_{k-1} \Delta t_k) - 1}{\omega_{k-1}^2} \dot{y}_{k-1}^p \\ \frac{\partial \dot{x}_{k-1}^p}{\partial \omega_{k-1}} &= \Delta t_k \sin(\omega_k \Delta t_k) \dot{x}_{k-1}^p - \Delta t_k \cos(\omega_{k-1} \Delta t_k) \dot{y}_{k-1}^p \\ \frac{\partial \dot{y}_{k-1}^p}{\partial \omega_{k-1}} &= \cos(\omega_{k-1} \Delta t_k) \dot{x}_{k-1}^p - \Delta t_k \sin(\omega_{k-1} \Delta t_k) \dot{y}_{k-1}^p\end{aligned}$$

测距传感器节点的测量模型为

$$z_k^j = h_j(x_k) + v_k^j = \sqrt{(x_k^p - x_s^j)^2 + (y_k^p - y_s^j)^2} + v_k^j \quad (5.59)$$

式中,  $(x_k^p, y_k^p)$  为目标位置,  $(x_s, y_s)$  为传感器位置,  $v_k^j \in N(0, R_k^j)$ 。该测量模型是非线性模型, 在滤波算法中要计算其雅克比矩阵为

$$H_j^k = \begin{bmatrix} \frac{-(x_k^p - x_s^j)}{\sqrt{(x_k^p - x_s^j)^2 + (y_k^p - y_s^j)^2}} & \frac{-(y_k^p - y_s^j)}{\sqrt{(x_k^p - x_s^j)^2 + (y_k^p - y_s^j)^2}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.60)$$

## 2. 交互式多模型滤波

目前常见的机动目标跟踪状态估计算法有: 基于 Bayes 估计的 Kalman 滤波, 基于序贯蒙特卡洛的粒子滤波和基于多个运动模型的交互式多模型 (IMM) 的滤波算法。对于机动目标跟踪来说, 其运动轨迹很难用单一的运动模型去描述, 考虑到算法的复杂度、存储量和工程应用的需求, IMM 滤波算法得到了较为广泛的应用。

IMM 滤波算法的线性化状态方程和测量方程为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}_{k|M_k} \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\omega}_{k|M_k} \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{h}_{k|M_k} \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\nu}_{k|M_k} \end{cases} \quad (5.61)$$

式中,  $\mathbf{x}_{k+1}$  为  $k$  时刻系统状态向量;  $\mathbf{f}_{k|M_k}$  为状态转移矩阵;  $\boldsymbol{\omega}_{k|M_k}$  和  $\boldsymbol{\nu}_{k|M_k}$  是零均值, 方差分别为  $Q_{k|M_k}$  和  $R_{k|M_k}$  的高斯白噪声且互不相关。 $\mathbf{z}_k$  是测量值,  $\mathbf{h}_{k|M_k}$  是观测矩阵;  $M_k^i = \{M_k = M^i\}$  表示  $t_k$  时刻  $M_k$  有效。所有可能的系统模式集为  $M = \{M^1, M^2, \dots, M^n\}$ 。

Markov 过程的定义如下: 给定随机过程  $\{x(t), t \in T\}$ , 如果对任意正整数  $n \geq 3$ , 任意的  $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ ,  $t_i \in T$ ,  $i = 1, \dots, n$ , 任意的  $x_1, \dots, x_n \in E$ , 其中  $E$  是  $x(t)$  的状态空间, 条件概率函数总是满足如下条件, 即

$$(x(t_n) \leq x_n | x(t_1) = x_1, \dots, x(t_{n-1}) = x_{n-1}) = P(x(t_n) \leq x_n | x(t_{n-1}) = x_{n-1}) \quad x_n \in R \quad (5.62)$$

则称  $\{x(t), t \in T\}$  为 Markov 过程。

在 IMM 滤波模型中, 模型从  $M_k^j$  到  $M_{k+1}^j$  的转换概率为

$$P\{M_{k+1}^j | M_k^j\} = \pi_{ji} \quad M_k^j, M_{k+1}^j \in M \quad (5.63)$$



式中,  $\sum_{i=1}^n \pi_{ji} = 1$  ( $j=1, 2, \dots, N$ )。各模型在不同时刻按照状态转移概率矩阵已知的 Markov 过程进行切换, 实现转移概率对滤波器的输入/输出进行修正, 这就是 IMM 滤波算法的核心。IMM 滤波算法框图如图 5-32 所示。

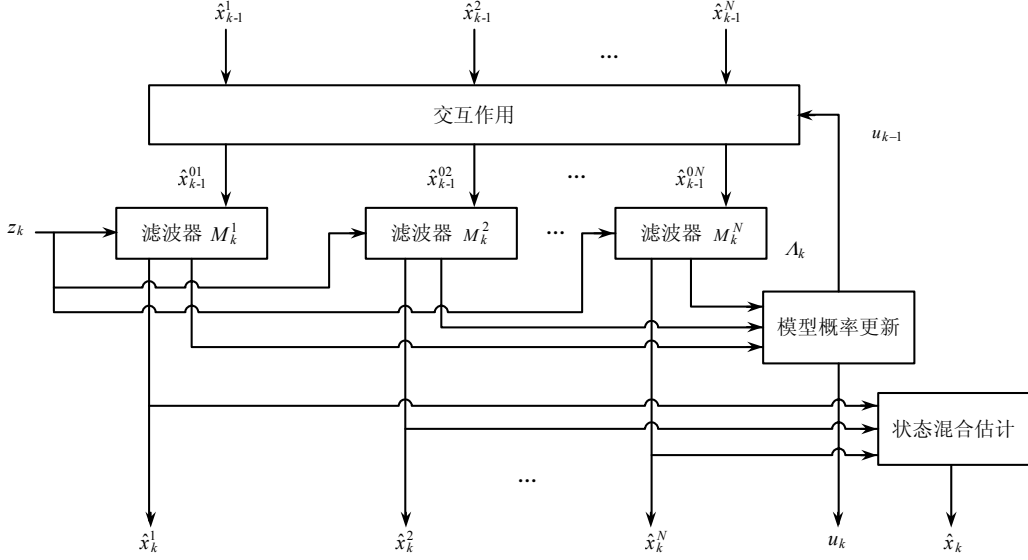


图 5-32 IMM 滤波算法框图

经典 IMM 滤波算法的每一次估计包括输入交互、各个模型的滤波计算、模型概率更新和输出交互四步。

(1) 输入交互。利用上一刻状态及模型条件概率为每个模型计算输入状态及协方差矩阵, 即

$$\hat{x}_{k-1}^{0i} = \sum_{j=1}^n \hat{x}_{k-1}^j \mu_{k-1}^{ji} \quad (5.64)$$

$$P_{k-1}^{0i} = \sum_{j=1}^n \mu_{k-1}^{ji} (P_{k-1}^j + \alpha \alpha^T) \quad (5.65)$$

式中  $\alpha = [\hat{x}_{k-1}^j - \hat{x}_{k-1}^{0i}]$ ,  $\mu^{ji}$  表示模型预测概率, 可表示为

$$\mu^{ji} = P\{\mu_{k-1}^{ji} | \mu_k^i\} = \frac{1}{c^i} \pi_{ji} \mu_{k-1}^i \quad (5.66)$$

式中,  $c^i = \sum_{j=1}^N \pi_{ji} \mu_{k-1}^i$ , 代表  $\mu_k^i$  在  $k$  时刻模型为  $M^i$  的概率, 即  $\mu_k^i = P\{M_k^i\}$ 。

(2) 各个模型滤波计算。根据输入交互得到的信息和  $z_k$  时刻的测量数据集  $z_k$ , 对各个模型进行卡尔曼滤波。 $z_k$  是多传感器测量值, 如果有  $n$  个传感器参加测量工作, 观

测矩阵或观测矩阵的雅克比矩阵  $\mathbf{h}^i = [h_{s1} \ h_{s2} \ \dots \ h_{sn}]^T$ ,  $\mathbf{h}_{sj}$  是传感器  $s_j$  的测量函数或者测量函数的雅克比矩阵。

第  $i$  个模型在  $k$  时刻状态和协方差的预测为

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^i = \mathbf{f}^i \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{0i} \quad (5.67)$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1}^i = \mathbf{f}^i \mathbf{P}_{k-1}^{0i} (\mathbf{f}^i)^T + \mathbf{Q}^i \quad (5.68)$$

卡尔曼滤波器的信息矢量为

$$\mathbf{v}_k^i = \mathbf{z}_k - \mathbf{h}^i \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^i \quad (5.69)$$

信息的方差矩阵为

$$\mathbf{S}_k^i = \mathbf{h}^i \mathbf{P}_{k|k-1}^i (\mathbf{h}^i)^T + \mathbf{R}^i \quad (5.70)$$

增益矩阵为

$$\mathbf{K}_k^i = \mathbf{P}_{k|k-1}^i (\mathbf{h}^i)^T (\mathbf{S}_k^i)^{-1} \quad (5.71)$$

状态及协方差更新方程为

$$\hat{\mathbf{x}}_k^i = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^i + \mathbf{K}_k^i \mathbf{v}_k^i \quad (5.72)$$

$$\mathbf{p}_k^i = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k^i \mathbf{h}^i) \mathbf{P}_{k|k-1}^i \quad (5.73)$$

(3) 模型概率更新。模型概率表明在某一时刻各模型匹配当前模式的概率, 可由 Bayes 定理给出。模型概率更新方程如下

$$\mu_k^i = P\{M_k^i\} = \frac{1}{c} \Lambda_k^i \sum_{j=1}^N \pi_{ji} \mu_{k-1}^j \quad (5.74)$$

式中, 归一化因子  $c = \sum_{j=1}^N \Lambda_k^i c^j$ ,  $\Lambda_k^i$  表示在  $k$  时刻模型为  $M^i$  的似然函数。用信息和协方差更新计算  $k$  时刻模型的似然值, 即

$$\Lambda_k^i = N(\mathbf{v}_k^i : 0, \mathbf{S}_k^i) = \left| 2\pi \mathbf{S}_k^i \right|^{-\frac{1}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{v}_k^i)^T (\mathbf{S}_k^i)^{-1} \mathbf{v}_k^i \right\} \quad (5.75)$$

(4) 输出交互。由所有模型的状态估计加权得到最终的状态估计量和协方差阵为

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{x}}_k^i \mu_k^i \quad (5.76)$$

$$\mathbf{p}_k = \sum_{i=1}^N \mu_k^i [p_k^i + (\hat{\mathbf{x}}_k^i - \hat{\mathbf{x}}_k)(\hat{\mathbf{x}}_k^i - \hat{\mathbf{x}}_k)^T] \quad (5.77)$$

因为 IMM 滤波算法在每个循环的开始时就综合了之前的估计信息, 所以避免了最优估计方法的复杂性随时间成指数增长的缺陷。

### 3. 跟踪精度与能量模型

在无线传感器网络目标跟踪中,有很多指标可以表示跟踪精度,比如状态协方差矩阵的迹或者行列式等,本文中选用协方差矩阵的迹作为跟踪精度指标,考虑所用的常速度模型和协调转弯模型,跟踪精度表示为

$$\Phi_k = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] P_k [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (5.78)$$

无线传感器网络节点一般采用电池供电,在一定的条件下可以视为线性电源,在计算节点的能量时,不考虑电池电压变化所带来的影响。传感器节点消耗能量的模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块。在这些模块中,对能量消耗最大的部分是通信,它比感应和计算消耗能量大得多。

关于具体消耗能量的计算采用如下模型:如果当前节点  $s_i$  选择节点  $s_j$  通信,消耗的总能量为

$$E(i, j) = E_t(i, j) + E_r(j) = (e_t + e_r + e_d r_{ij}^\alpha) b_1 \quad (5.79)$$

式中,  $b_1$  是通信的数据位数;  $E_t(i, j) = (e_t + e_d r_{ij}^\alpha) b_1$  表示从节点  $s_i$  发送信息到节点  $s_j$  所消耗的能量;  $E_r(j) = e_r b_1$  是节点  $s_j$  接收信息时所消耗的能量;  $r_{ij}$  是节点  $s_i$  到节点  $s_j$  的距离;  $e_d$ 、 $e_s$  和  $e_t$  是常数,分别由发送端和接收端模块决定;  $\alpha$  是一个与通信信道有关的衰减因子。

### 4. 目标协同跟踪算法的实现

#### 1) 算法步骤

一个好的目标跟踪算法既要满足无线传感器网络能量高效的要求,又要有很好的跟踪质量,是目标跟踪调度研究的核心,其最基本的一点就是,在保持估计误差在一定的精度内仍能跟踪目标。这里给出的自适应多传感器协同跟踪算法,就是基于该思想的一种调度算法,该算法的目标跟踪示意图如图 5-33 所示。

(1) 目标进入无线传感器网络监测区域。目标在  $k=0$  初始时刻进入无线传感器网络的监测区域,先验信息唤醒靠近目标的一个初始簇  $C_1 = (o_1, s_1, \dots, s_{c1})$ , 初始簇包含  $c_1 + 1$  个传感器节点,  $O_1$  为初始簇首,  $s_1, \dots, s_{c1}$  为簇内节点。为了适应机动目标运动模型的状态估计,采用 IMM 滤波方法,  $O_1$  节点从初始的先验分布中得到初始估计均值和协方差  $\hat{x}_{0|0}$  及  $p_{0|0}$ 。

(2) 状态估计。簇首节点唤醒簇内的各个节点共同参与感知移动目标,并将信息传递给簇首节点。簇首  $O_k$  节点对所有的簇内节点测量值通过集中式信息融合得到优化测量值  $Z_k = \{z_k^1, z_k^2, \dots, z_k^{c_k}, z_k^{Ok}\}$ , 通过 IMM 滤波算法,更新后得到  $k$  时刻目标状态的估计均值和协方差为  $\hat{x}_{k|k}$  及  $p_{k|k}$ 。

(3) 预测下一时刻的跟踪精度。利用当前分簇,尽可能采用较大的采样间隔预测下

一时刻目标状态的跟踪精度, 如果预测跟踪精度满足要求, 则转向第二步, 继续利用当前分簇继续进行状态估计, 否则转向下一步骤。具体如下: 设定采样间隔  $\Delta t_k$  的范围为  $[T_{\min}, T_{\max}]$ , 这里  $T_{\min}$  和  $T_{\max}$  分别表示最小和最大间隔。当前簇首利用簇内各个节点仿真出测量的融合值, 并从最大的间隔开始估计下一时刻的目标状态, 若达到预测精度满足跟踪精度阈值  $\Phi_0$ , 则重复第二步, 若即使采用最小的采样间隔, 预测精度也无法达到阈值, 则需要形成新簇。

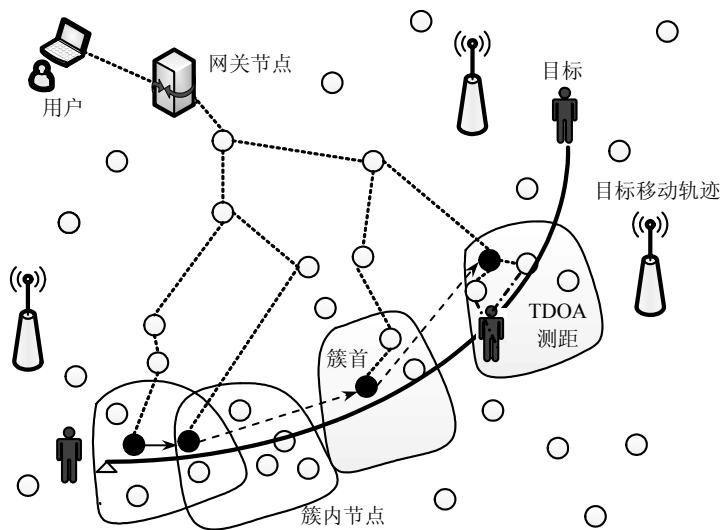


图 5-33 自适应多传感器协同跟踪算法的目标跟踪示意图

(4) 动态形成下一个分簇。新簇的形成包括选择簇内节点和簇首节点两个环节。

动态形成下一个分簇: 在能够感知到目标的节点中, 当前簇首节点在考虑预测精度要求的情况下, 选择簇内节点。其原则是尽可能选择较大的采样间隔和较少的簇内节点个数。具体过程如下: 当前候选节点的集合为  $S_c = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ , 即距离目标  $d_s$  远的所有节点的集合,  $d_s$  为节点的测距范围。首先根据候选节点与当前簇首预测目标位置的距离从小到大将候选节点排序为  $S_c = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ 。唤醒节点  $s_1$ , 利用节点  $s_1$  的测量方程, 计算出各自测量值并进行数据融合, 得到优化测量值, 采用最大的采样间隔  $T_{\max}$ , 进行状态估计  $(\hat{x}_{k+1}^{(s_1, T_{\max})}, p_{k+1}^{(s_1, T_{\max})})$ , 如果跟踪精度满足要求, 则新簇节点集合为  $G_{k+1} = \{s_1\}$ , 采样间隔为  $T_{\max}$ 。若不满足精度要求, 则减小采样间隔, 重新估计预测精度, 如果即使采用最小的采样间隔  $T_{\min}$ , 也无法满足精度要求, 则唤醒节点  $s_2$ , 利用节点  $s_1$  和  $s_2$  的测量方程, 计算出各自测量值再进行数据融合, 得到优化测量值, 再采用不同的采样间隔, 进行状态估计  $(\hat{x}_{k+1}^{(s_1, s_2, \Delta t)}, p_{k+1}^{(s_1, s_2, \Delta t)})$ , 如果满足精度要求, 则新簇集合为  $G_{k+1} = \{s_1, s_2\}$ , 采样间隔为  $\Delta t_k$ 。如果采用最小的采样间隔  $T_{\min}$  还不满足精度要求, 唤醒  $s_3$ , 依次下去, 直到满足精度要求或者唤醒所有候选节点为止。

下一时刻簇首的选择：在新形成的分簇节点中，当前簇首根据传输信息所需能量消耗和能量均衡分配的原则，选择代价目标最优的候选节点作为下一时刻的簇首节点。具体过程如下：分簇节点集合为  $G_{k+1} = \{s_1, s_2, s_n\}$ ，其中各个节点的剩余能量分别为  $E_{R1}, E_{R2}, \dots, E_{Rn}$ ，选择其中任一个节点作为下一时刻簇首节点消耗的能量总和，分别为  $E_{c1}, E_{c2}, \dots, E_{cn}$ 。当前簇首节点为  $O_k$ ，若选择  $G_{k+1}$  中的  $G_{k+1}$  作为下一时刻的簇首，则消耗的能量主要包括以下几个部分： $O_k$  向  $s_j$  传输状态及方差等信息所消耗的能量  $E_{c_j} = E_1(O_k, s_j)$ ； $s_j$  接收来自  $O_k$  的信息消耗的能量  $e_r b_2 \cdot (n-1)$ ，接收来自簇内其他节点的测量信息所消耗的能量  $\sum_{i=1, i \neq j}^n E_t(s_i, s_j)$  和簇内节点向簇首节点传递测量信息所消耗的能量，故选择  $s_j$  作为下一时刻簇首节点消耗的总能量为

$$E_{c_j} = E_1(O_k, s_j) + e_r b_1 + e_r b_2 \cdot (n-1) + \sum_{i=1, i \neq j}^n E_t(s_i, s_j) \quad (5.80)$$

式中， $b_1$  为簇首之间传输的状态及方差等信息的位数， $b_2$  为簇内节点向簇首节点传递测量信息的位数。综合考虑能量消耗和能量均衡分布两个性能指标，选择下一时刻簇首节点的目标函数为

$$O_{k+1} = \arg \min_{i=1,2,\dots,n} (E_{ci} + \beta \arg \max_{i=1,2,\dots,n} E_{Ri}) - E_{Ri} \quad (5.81)$$

式中， $\beta$  表示能量均衡参数，用来改变能量均衡性能所占权重。动态形成下一个分簇的伪代码流程图如图 5-34 所示。

```

选择簇内节点：
候选节点排序：  $S_c = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ 
For  $i = 1 : N$ 
  仿真测量值  $z_{k+1} = \{z_k^{s_1}, \dots, z_k^{s_i}\}$ 
  For  $\Delta t = T_{\max} : T_{\min}$ 
    更新状态  $x_{k+1}^{(s_1, \dots, s_i, \Delta t)}$ 
    满足精度 退出循环
  End
End
当前簇为  $G_{k+1} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 
选择簇首：  $O_{k+1} = \arg \min_{i=1,2,\dots,n} (E_{ci} + \beta[(\arg \max_{i=1,2,\dots,n} E_{Ri}) - E_{Ri}])$ 

```

图 5-34 分簇形成伪代码流程图

(5) 动态跟踪。首先判断目标是否移出监测区域，如果移出，则跟踪停止；否则由当前簇首节点将当前时刻的状态估计信息传递给下一时刻簇首节点，下一时刻簇首节点成为当前簇首节点，转向第二步。一旦簇首节点完成信息交接，则上一时刻的分簇内的节点处于休眠状态，新簇内的节点被唤醒，开始工作。其跟踪过程流程图如图 5-35 所示，图中虚线包围的部分正是图 5-34 所表示的内容。

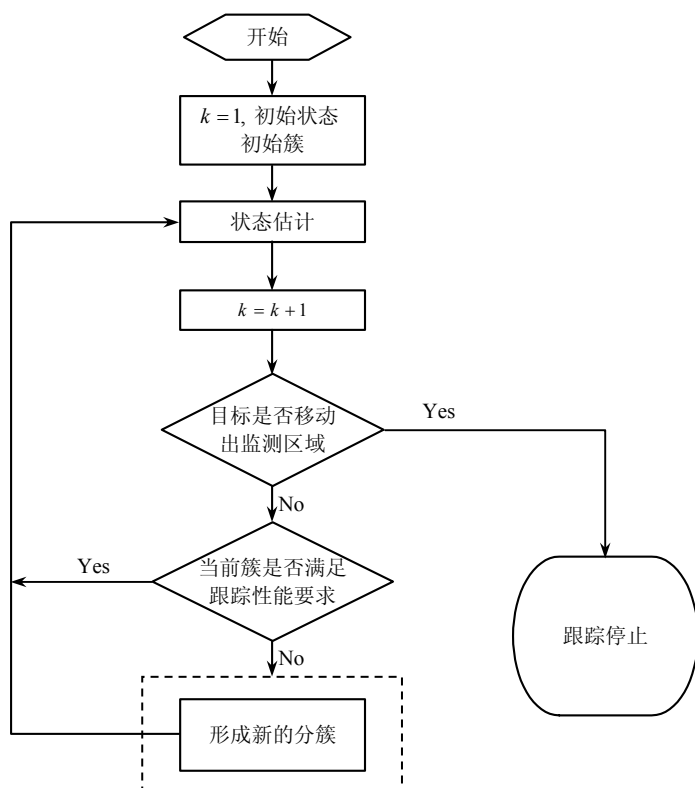


图 5-35 跟踪过程流程图

## 2) 算法分析

理想的无线传感器网络跟踪算法具有可扩展性、渐进精度特性、实时性、可靠性和自适应性等优点，因此在分析节点调整算法时，需要考虑的指标包括能量消耗与均衡分布、跟踪精度、跟踪的鲁棒性和跟踪实时性等。在目标的跟踪中，要减少传感器能量消耗，除了设计有效算法降低处理器能耗之外，减少数据通信和节点间的交互才是根本。但是，要提高跟踪精度，就要融合多节点数据，采取比较复杂的算法，或传输较多的信息。可见能量消耗与跟踪精度是一对矛盾，一个好的节点调度算法就是要做到两者协调平衡。在跟踪精度方面，可采用簇内多传感器节点共同测量移动目标，通过信息融合后的测量值来进行状态估计，还可通过自适应配置簇内传感器节点的方式，以满足跟踪精度的要求。

由于能量消耗主要包括传感器、处理器和通信模块，其中最主要的能量消耗是通信能量消耗，因此在设计节点调度策略时，必须考虑尽量减少通信所带来的能量消耗。在设计自适应多传感器协同跟踪算法中，一方面在形成多传感器簇的时候，尽量在满足精度要求的同时，让最少的传感器节点成簇，这样就减少了传感器节点间的通信量，减少

了能量消耗；另一方面采用自适应采样间隔进行滤波，尽量采用较大的采样间隔，这样完成相同一段距离目标跟踪的时候，就会减少滤波器的估计次数，估计计算的次数越少，节点进行通信和计算的次数越少，也就节约了能量。一个新簇开始工作的时候，之前簇的簇内节点进入休眠状态，这也可以节约大量能量。

关于均衡节点间能量消耗的设计，簇首节点在簇内的任务是最重的，不仅要进行滤波运算和数据融合运算，还要与簇内各个节点进行数据交互和通信，并把簇首节点的滤波结果、节点 ID 等信息发送给下一时刻的簇首节点，如此频繁的通信需求消耗了簇首节点大量的储能。事实上，如果一个传感器节点总是作为簇首节点，就会造成这个节点的能量迅速耗尽，成为死节点，这对于形成簇拓扑结构是不利的。因此要限制一个节点作为簇首的次数，这也是自适应多传感器协同跟踪算法中选择簇首节点需要考虑节点剩余能量的原因。鲁棒性是指在网络拓扑结构发生变化或数据丢失的情况下，跟踪算法能够快速恢复对目标的跟踪；实时性是指用户能够实时获得跟踪信息，这就需要考虑算法的复杂度以及路由的时效性。在本算法中，可以扩展采用不确定观测情况下的滤波算法，这种自适应多传感器协同跟踪算法在协调跟踪精度和能量消耗问题上做了一个折中处理。

### 3) 算法仿真

考虑一个二维平面上的机动移动目标，其运动方程为

$$x_k = (F_1(\Delta t_k), F_2(\Delta t_k), r_k) x_{k-1} + w_{k-1} \quad (5.82)$$

混合模型的转移概率矩阵为  $\begin{bmatrix} 0.95 & 0.95 \\ 0.95 & 0.95 \end{bmatrix}$ ，初始概率分布为  $[0.95 \quad 0.95]$ 。在  $100\text{m} \times 100\text{m}$  的监测区域内，目标的初始状态均值为  $\hat{x}_{0|0} = [10 \quad 20 \quad 10 \quad 10]$ ，方差为  $p_0 = 10 \times \text{diag}[1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$ ，系统的过程噪声强度  $q=20$ 。目标的实际切换序列为

$$r_1, \dots, r_{40} = M^1, \quad r_{41}, \dots, r_{90} = M^2, \quad r_{91}, \dots, r_{130} = M^3$$

在监测区域内随机部署 40 个测距传感器节点，每个传感器的感知半径和通信半径均为 10m。测距传感器节点  $s_j$  的测量模型为

$$z_k^j = \sqrt{(x_k^p - x_s^j)^2 + (y_k^p - y_s^j)^2} + v_k^j \quad (5.83)$$

式中， $(x_k^p, y_k^p)$  为目标位置， $(x_s^j, y_s^j)$  为传感器  $s_j$  的位置，测量噪声  $v_k^j$  的方差为  $T_{\min} = 0.1\text{s}$ ， $T_{\max} = 0.5\text{s}$ ，采样间隔在  $0.1\text{s} \sim 0.5\text{s}$  之间选择；能量模型中设  $\alpha = 2$ ， $e_t = 45 \times 10^{-6}\text{J}$ ， $e_r = 135 \times 10^{-6}\text{J}$ ， $e_s = 50 \times 10^{-6}\text{J}$ ， $e_d = 10 \times 10^{-9}\text{J}$ ， $b_1 = 256\text{b}$ ， $b_2 = 16\text{b}$ ，每个节点的初始能量为  $0.1\text{J}$ ；簇首选择代价函数中  $\beta = 0.5$ ，跟踪精度性能阈值  $\varnothing_0 = 3$ ，采用自适应多传感器协同跟踪算法进行机动目标跟踪，其机动目标跟踪过程如图 5-36 所示。

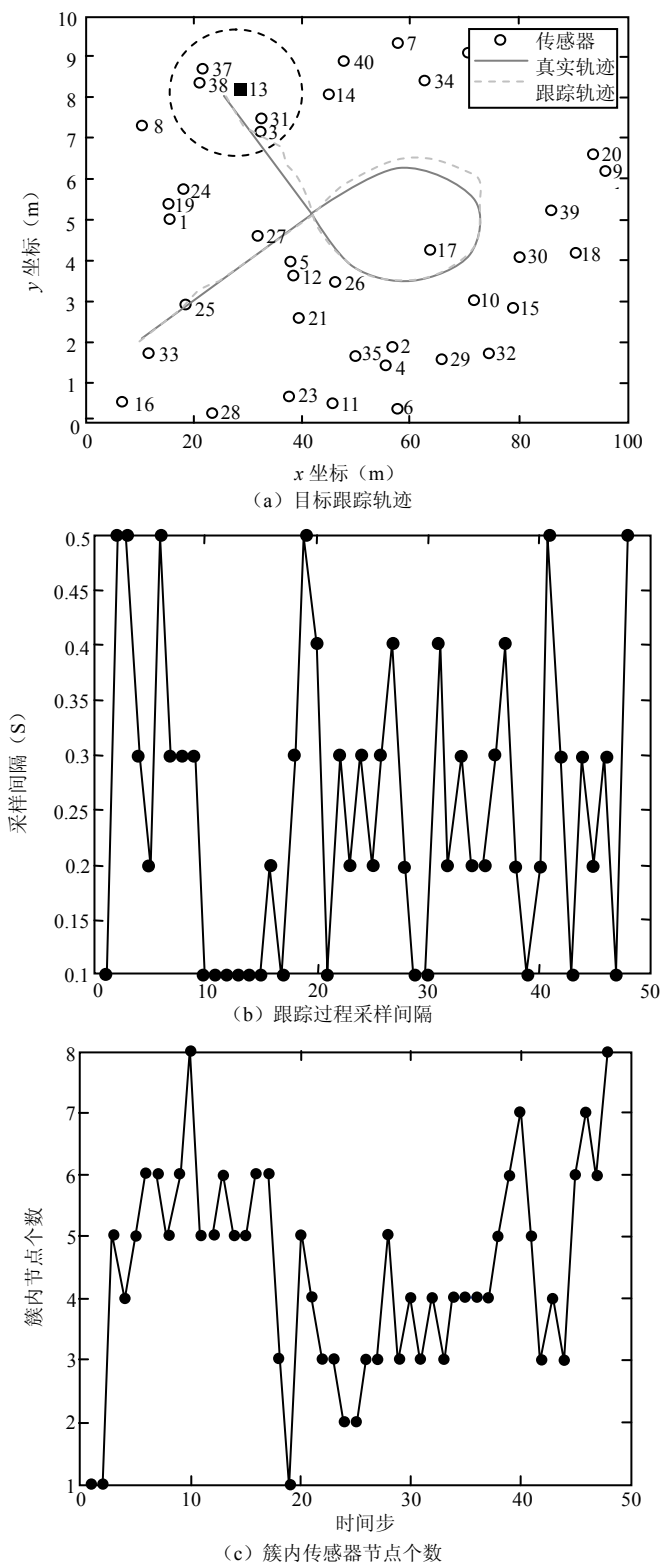


图 5-36 机动目标跟踪过程



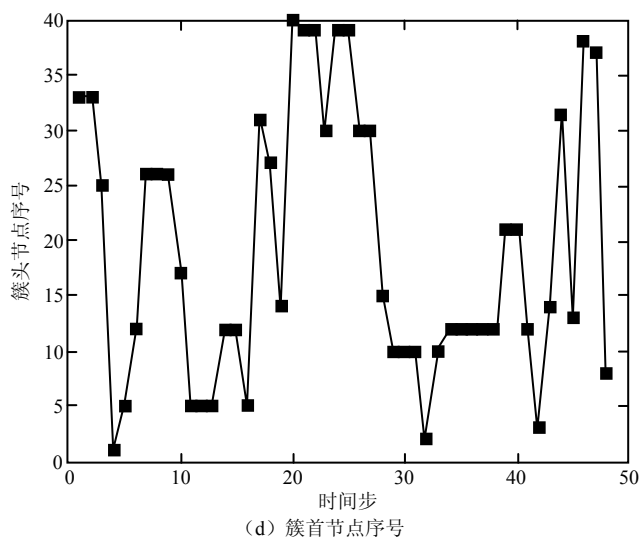


图 5-36 机动目标跟踪过程 (续)

图 5-36 (a) 中黑色实线表示目标移动轨迹, 灰色虚线表示自适应多传感器协同跟踪算法的跟踪轨迹, 虚线所画圈圈内的 3、13、31、37、38 号节点是某一时刻的簇内节点, 其中 3 号节点是选中的簇首节点。结果显示, 自适应多传感器协同跟踪算法对于机动目标有良好的跟踪效果。它在跟踪的过程中采用变间隔采样和动态分簇的策略, 其跟踪过程采样间隔、簇内传感器节点个数及簇头节点序号分别如图 5-36 (b)、图 5-36 (c) 和图 5-36 (d) 所示。可见为了保证目标在转弯处仍取得较好的跟踪精度, 算法自适应地采用了较大的采样间隔和较多的传感器节点组成簇, 使多传感器协同工作; 而为了平衡能量消耗, 簇首节点也经常进行改变。

### 5.3 编码传输技术

由于无线传感器网络的节点能量和通信带宽均受到限制, 信息传输问题成为无线传感器网络中的关键问题之一, 而通过信息编码后再进行传输, 则可以大大降低能量损耗并能节省通信带宽, 因此编码传输已经成为解决无线传感器网络信息传输的有效途径。但由于无线传感器网络有着不同于传统网络的特点, 使得在应用编码传输技术时需要综合进行考虑。本节在介绍编码传输技术的基本概念后, 将以分布式编码作为重点, 阐述其基础理论和实现技术, 为无线传感器网络中的信息传输问题提供具体解决办法。

#### 5.3.1 编码传输技术的基本概念

传统的视频编码标准, 无论是 H.26x 系列还是 MPEG 系列, 编码器都是通过帧内预测、帧间预测 (运动估计)、变换和熵编码等手段来充分挖掘视频信号的数据相关性, 力

求获取高压压缩效率。帧间预测技术有效地去除了视频帧的时间相关性，是编码增益的主要贡献者，但其主要步骤——运动估计对计算能力和内存的要求非常高，使得编码器的复杂度远远大于解码器，大约是后者的 5~10 倍。这种复杂度不对称的编码方式对于广播、流媒体的点播等服务是非常有效的。因为在这些下行（downlink）传输模式中，视频序列只需编码一次，而在多个终端上可能进行多次解码，因此复杂的编码器和简单的解码器正好可以达到系统整体性能的最优。

这些压缩编码标准都是建立在 20 世纪 50 年代的香农定理基础上的。香农定理不仅仅对于单信源编码是成立的，对于多信源的联合编码也是适用的。在 MPEG 和 H.26x 标准中，时间上相邻的视频帧被看做多个信源，由编码端进行联合编码。联合编码时，编码端首先必须通过预测去除时间和空间上的相关性，将得到的残差看做一个独立信源进行基于香农定理的编码。这样的联合编码方式能够获得很好的压缩性能，但是在某些实际应用中可能不合适。例如，在某些编码端，资源非常有限或者多个信源分布在不同节点的场景中，联合信源编码难以实现。又比如，随着便携式摄像机、视频传感器网络、无线视频监控系統以及网络摄影等新的多媒体应用场景的出现，对视频压缩技术提出了新的要求。

在这类应用中，视频采集设备捕获视频流后需适时编码，然后通过有噪且带宽受限的无线网络传送到一个中心节点进行解码播放，这是一种典型的上行（uplink）传输模式。编码设备大多使用电池，能量、计算能力和内存都有限，而解码设备则拥有大量的资源，可以进行复杂的运算，这与传统视频编码方案的编码器和解码器的复杂度分配是不匹配的，因而传统的视频编码技术不再适用。为了获取系统整体性能的最优，一种很自然的想法就是把编码复杂度转移到解码端，也就是说在解码端挖掘信源的统计相关性。根据分布式编码理论，在解码端挖掘信源的相关性可以达到或者逼近在编码端挖掘信源相关性的压缩效率。基于分布式编码理论的视频编码称为视频分布式编码，它是一种全新的编码技术，具有低编码复杂度、高压压缩效率的特点，因而具有广阔的应用前景和重要的应用价值。

### 1. 视频编码特点

视频可以看成是一个时间轴上的图像序列，每个图像被称为一帧，各帧之间有着很强的相关性。在传统的观念中，一般理解视频编码为编码端通过帧间预测和 DCT 变换来去除时间冗余和空间冗余，以获取高压压缩效率，这就使得编码器对计算能力和内存容量的要求远远高于解码器。这一准则在很长一段时间内都没有受到挑战，因为在大多数视频应用中，如广播、视频流的点播等服务，视频序列只需要编码一次，而可能在多个终端上进行多次解码，因此复杂的编码器和简单的解码器正好可以获得系统整体性能的最优。然而，随着多媒体技术的发展，新的应用场景不断涌现，如视频传感器网络和无线视频

监控系统等。在这些应用中,视频采集设备往往在运算能力、内存和能量上都有一定的限制,无法承担传统视频编码标准中复杂的编码操作,而解码端的设备往往拥有大量的资源,可以进行复杂的运算。

## 2. 无线传感器网络特点

传感器网络是由许多分布在不同空间位置的自动装置(称为节点)组成的一种网络,各个节点使用传感器相互协作,共同监控不同位置的物理或环境状况(比如温度、声音、振动和压力等)。大部分时候节点之间都通过无线连接,具体表现为无线传感器网络。无线传感器网络的发展最初起源于战场监测等军事应用,现今已经被应用于很多民用领域,如环境与生态监测、家庭自动化和交通监控等。无线传感器网络具有以下特点:① 无线传感器节点往往数目众多且分布密集,所以采集的数据量庞大且冗余度高。特别是相机无线传感器网络,单个传感器节点采集的视频或图像的数据量就不小,而众多传感器节点共同产生的数据量就更是大得惊人,而且邻近的相机捕获的场景往往有很多重叠区域,导致采集到的图像高度冗余;② 每个节点的硬件构成都比较简单,通常包括一个或者多个传感器、一个无线收/发器、一个微控制器以及一个电池,其计算能力、带宽和能源都非常有限;③ 整个无线传感器网络中的通信包括各个节点之间的通信和各个节点到基站节点的通信,受限于硬件条件的传输带宽非常有限,而且整个通信网络的设置也是一个很大的挑战。为了去除传感器节点间的数据冗余,不能对各节点的数据独立编码和解码;若对相邻节点的数据进行联合编码和解码,则传感器节点间必须通信,占用大量的带宽资源,因而联合编码和解码的方案也是不可行的。

## 3. 无线传感器网络视频分布式编码需求分析

以上所述的这些特点对各个节点数据的压缩编码方式提出了新的要求:① 各个密集分布的节点上资源非常有限,而进行比较复杂的编码操作对计算能力、能源都是很大的负担,因此目前很多比较高效但是复杂度也高的压缩算法都是不适用的,需要高效并能保持较低编码复杂度的新算法;② 各个节点之间的通信、节点网络的布置带来的困难使得人们希望最好能够让各个节点独立编码,减少编码时节点之间的联系。分布式编码的特点正好符合了无线传感器网络数据压缩的要求,各个节点独立编码,可以保持较低的编码复杂度;同时各个节点的码流汇聚到基站节点进行联合解码,可以得到比较高的压缩效率。分布式编码技术对各传感器节点的数据独立编码,压缩后的码流传输到中心节点进行联合解码,不仅可避免传感器节点间的通信,而且可在中心节点去除节点间的数据冗余,提高压缩效率。与独立编/解码方案相比,分布式编码大大减少了需传输的数据量,不仅节约了带宽资源,而且降低了传感器节点发送数据的能量消耗;与联合编码和解码方案相比,分布式编码将利用节点间的数据相关性的任务从传感器节点转移到中心

节点,从而将复杂度从能量和内存都有限的传感器节点转移到拥有大量资源的中心节点,这正好匹配传感器网络的资源分配情况。因此,分布式编码技术可以优化利用传感器网络的资源,延长传感器网络的使用寿命。

视频分布式编码技术对视频帧独立编码、联合解码,在解码端去除相邻帧的时间冗余,从而将复杂度从编码端转移到解码端。与传统的视频编码标准相比,视频分布式编码方案具有帧内编码(Intraframe Coding,即I帧)的编码复杂度,在理论上具有帧间编码(Interframe Coding,即P帧和B帧)的压缩效率。视频分布式编码潜在的优势为它赢得了广泛的应用前景。首先,编码复杂度低,解决了编码端资源受限的问题,编码器和解码器的复杂度分配情况正好与便携式摄像机、视频传感器网络、无线视频监控系统等应用系统的资源分配情况一致,可以达到系统整体性能的最优。其次,编码器无须知道边信息的具体值,所以解码端在生成边信息时具有很大的灵活性:对于一个解码端复杂度受限的系统,可以直接用先前重建的帧作为边信息,代价只是较高的码率;对于一个带宽受限的系统,可以利用复杂的运动补偿技术来获取高质量的边信息,以降低码率,减小传输带宽需求;对于一个低延迟系统,可以对视频帧按时间顺序编码和解码,解码端利用先前重建的帧,通过运动补偿外推技术获取边信息,为了提高运动估计的准确度,还可以利用hash来辅助运动估计。由于解码端对边信息的具体值没有要求,所以可以有效地防止预测失配带来的解码错误,并可以阻止错误传播。

根据前面所述的无线传感器网络视频编码的两点要求,可以将视频分布式编码分为单视点的视频分布式编码方案和多视点的视频分布式编码方案。在单视点视频分布式编码方案中,将各个视频帧看成多个独立同分布的相关信源进行分布式编码,将编码复杂度转移到解码端,从而非常适合一些新的视频应用场景。在多视角视频分布式编码方案中,视频不仅仅包括时间上的连续帧,也包括不同的离散视角,因此多视角视频信源不仅仅将同一视角时间上的各帧可以看成相关信源,同一时间视角上的不同帧也可以看成相关信源。本节主要针对第一种单视点视频分布式编码方案进行重点介绍。

### 5.3.2 分布式编码基础理论

分布式编码的理论基础是Slepian-Wolf理论和Wyner-Ziv理论。早在20世纪70年代,学者Slepian和Wolf(1973)就提出了无损分布式编码理论,证明了两个独立同分布的离散随机变量,单独编码、联合解码可以达到联合编码和解码的压缩效率。随后,学者Wyner和Ziv(1976)进一步发展了这一理论,将其扩展到连续信源的有损编码,建立了在率失真限制条件下解码端采用边信息辅助解码的有损分布式编码理论。

#### 1. Slepian-Wolf 的理论

考虑两个统计相关的独立同分布(i.i.d.)的无记忆随机序列 $X$ 和 $Y$ ,如果采用传统的

熵编码技术分别对两者进行单独编码和单独解码, Shannon 无损信源编码定理说明, 无失真信息传输速率必须满足

$$\begin{cases} R_X \geq H(X) \\ R_Y \geq H(Y) \end{cases} \quad (5.84)$$

式中,  $R_X$ 、 $R_Y$  和  $H(X)$ 、 $H(Y)$  分别是序列  $X$ 、 $Y$  的码率和信息熵。

如果对  $X$  和  $Y$  进行联合编码及联合解码, 则其失真信息传输速率必须满足

$$\begin{cases} R_Y \geq H(Y) \\ R_X \geq H(X|Y) \\ R_X + R_Y \geq H(X|Y) + H(Y) = H(X, Y) \end{cases} \quad (5.85)$$

式中,  $H(X|Y)$  为序列  $X$  在已知  $Y$  的情况下的条件熵,  $H(X, Y)$  是序列  $X$  和  $Y$  的联合信息熵。

Slepian-Wolf 理论指出, 当对长序列进行编码时, 如果允许存在一个任意小的解码错误概率, 则对  $X$  和  $Y$  分别进行独立编码, 然后再进行联合解码可获得与联合编码和解码相同的信息传输速率。它相当于只在解码端利用  $X$  和  $Y$  的统计相关性。对  $X$  和  $Y$  独立编码、联合解码, Slepian 和 Wolf (1973) 证明了失真信息传输速率必须满足下列条件

$$\begin{cases} R_X \geq H(X|Y) \\ R_Y \geq H(Y|X) \\ R_X + R_Y \geq H(X, Y) \end{cases} \quad (5.86)$$

随着序列长度的增大, 解码的误比特率将无限趋近于 0。满足这个条件的码率区域称为允许码率区域 (admissible rate region)。允许码率区域示意图如图 5-37 所示, 其冗余码率分配情况, 分布式编码可以分为对称编码和非对称编码。如果先对  $Y$  进行独立编/解码, 码率  $R_Y = H(Y)$ , 然后以  $Y$  为边信息, 对  $X$  进行分布式编码, 码率  $R_X \geq H(X|Y)$ , 允许码率区域边界上的拐点  $A$  (或  $B$ ), 这种形式称为非对称编码; 如果  $X$ 、 $Y$  的码率不在  $A$ 、 $B$  两个拐点处, 则称为对称编码。

## 2. Wyner-Ziv 理论

在 Slepian 和 Wolf 的工作基础上, Wyner 和 Ziv (1976) 将 Slepian-Wolf 理论扩展到连续信源有损压缩的情况, 建立了在解码端采用边信息辅助解码的有损分布式编码率失真理论。Wyner-Ziv 理论认为, 两个独立同分布的随机过程  $X$  和  $Y$ , 可能有无限的符号集, 对信源  $X$  独立编码, 解码端把  $Y$  作为边信息进行联合解码, 从而得到  $X$  的重建值  $\hat{X}$ 。如图 5-38 所示, 令  $D = E[d(X, \hat{X})]$  表示失真度,  $R_{X|Y}(D)$  表示在编码端和解码端均已知  $Y$  的情况下, 对  $X$  进行残差编码的率失真函数,  $R_{X|Y}^{WZ}(D)$  表示在解码端已知  $Y$  而编码端不知  $Y$  的情况下, 对  $X$  独立编码, 以  $Y$  为边信息联合解码的率失真函数。Wyner-Ziv 理论证

明了, 一般情况下有

$$R_{X|Y}^{WZ}(D) \geq R_{X|Y}(D) \quad (5.87)$$

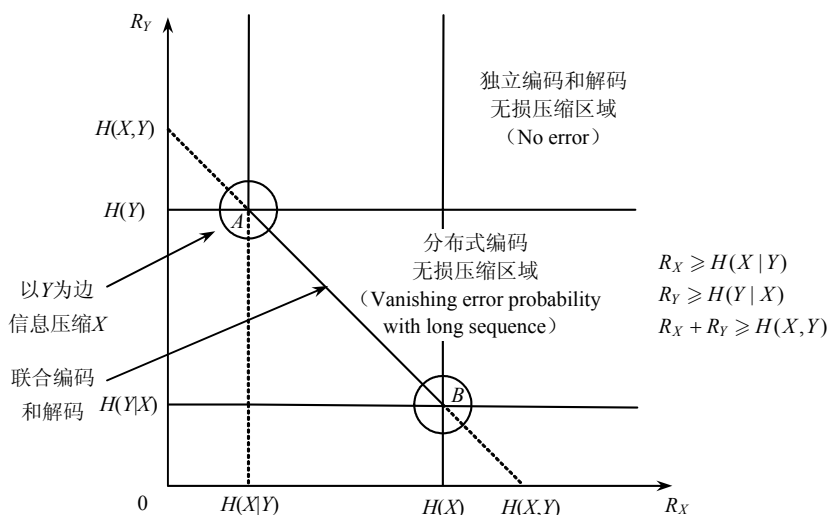


图 5-37 允许码率区域示意图

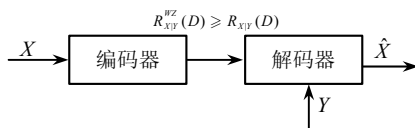


图 5-38 解码端已知边信息的有损编码示意图

当信源为高斯无记忆信源, 且失真为均方误差时, 等号成立, 即

$$R_{X|Y}^{WZ}(D) = R_{X|Y}(D) = \frac{1}{2} \log_+ \left[ \frac{(1 - \rho^2) \sigma_X^2}{D} \right] \quad (5.88)$$

式中,  $\rho$  为  $X$  和  $Y$  的相关系数,  $\sigma_X^2$  为  $X$  的方差。后来, Pradhan (2003) 等人把 Wyner-Ziv 理论扩展到更广义的情况, 即如果信源  $X = Y + U$ , 其中  $U$  是与  $Y$  独立的高斯噪声,  $Y$  作为边信息,  $X$  和  $Y$  服从任意分布, 则在均方误差失真的条件下,  $R_{X|Y}^{WZ}(D) = R_{X|Y}(D)$  也成立。

由于实际信号大多是连续信号, 要求在某个失真度约束下进行有损压缩, 所以现有的分布式编码的实用框架大多是基于 Wyner-Ziv 理论的, 称为 Wyner-Ziv 编码 (WZC)。

### 5.3.3 分布式编码实现技术

基于 Slepian-Wolf 理论和 Wyner-Ziv 理论的编码技术统称为分布式编码。这两个理论虽然给出了分布式编码的码率极限, 但没出提供编码和解码的方法, 即如何对相关信源进行编码和解码。Wyner 于 1974 年发现, Slepian-Wolf 编码与信道码紧密相似, 这一重要的发现为分布式编码的实现技术提供了思路。然而, 由于缺乏实际应用场景, 分布式

编码的设计工作未能及时开展,直到 Pradhanand Ramchandran (1999) 才提出分布式编码的第一个实现框架。此后,分布式编码引起了学者们的极大关注,迅速成为编码领域的一个研究热点。

### 1. Slepian-Wolf 编码方案的实现

现有的 Slepian-Wolf 编码方案几乎都利用 Slepian-Wolf 编码与信道码的相似性 (Wyner, 1974), 借用传统的信道码技术实现。现有的信道码技术已经相当成熟, 这为 Slepian-Wolf 编/解码器的设计奠定了基础。由于绝大多数分布式编码实用系统都采用非对称编码方式, 所以, 只介绍非对称 Slepian-Wolf 编码方案, 即在解码端已知边信息的情况下, 对信源进行分布式编码。

假设  $X$  和  $Y$  是两个独立同分布的二进制序列, 长度为  $N$ , 差错序列  $Z = X \oplus Y$ , 解码端已知  $Y$ 。Slepian-Wolf 编码框架示意图如图 5-39 所示, 编码端对序列  $X$  进行信道编码(系统码), 生成的码字由信息位和校验位两部分组成, 通常只需把校验位传送到解码端, 无须传送信息位。由于  $X$  和  $Y$  是统计相关的, 所以  $Y$  可以看做是信息位经由一个相关信道传送到解码端的, 信道噪声  $Z$  通常称为相关噪声, 表征了  $X$  与  $Y$  的统计相关性。这样, 解码端就可以把  $Y$  和接收到的校验位重新组合成码字, 进行信道解码, 纠正  $Y$  的错误, 从而恢复源序列  $X$ 。如果  $X$  与  $Y$  相似度较高, 也就是相关噪声较小, 则正确解码所需要的校验位数  $M$  较小 ( $M < N$ ), 从而实现了压缩。相关噪声的大小和信道码的纠错性能共同决定编码效率。与传统的信道码不同的是, 信息位并未在实际系统中传送, 只是为了加强 Slepian-Wolf 编码与信道码的关联, 而把信息位看做是从一个虚拟的相关信道传送到解码端的。校验位是通过实际信道传送的, 对于信源编码来说, 不考虑实际信道噪声, 则实际信道为理想信道; 若考虑实际信道噪声, 则该方案为信源信道联合编码 (jointsource-channel coding, JSCC)。

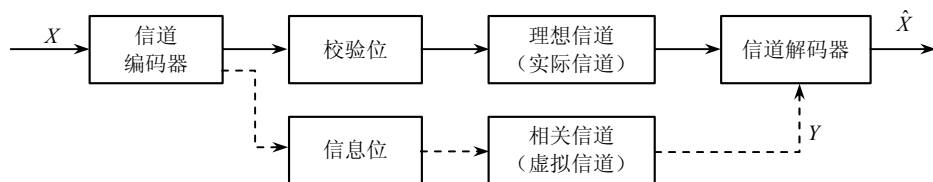


图 5-39 Slepian-Wolf 编码框架示意图

还可以从另一个角度来理解分布式编码: 把信源码字空间划分成多个不同的陪集, 使得在每一个陪集中的任意两个码字之间的最小距离尽可能达到最大。编码器只传输信源  $X$  所在陪集的索引即伴随式, 解码器在相应陪集中找到与边信息  $Y$  距离最近的码字作为解码结果。

由于陪集的特性和信道码的特性十分相似, 因此陪集的分割和解码均可以利用信道

码来实现。从这个角度来说, 上面的两种解释可以认为是等价的。

一般而言, 可以采用不同的信道码设计 Slepian-Wolf 编码器。信源包括二进制信源和多进制信源; 信道包括二进制对称信道、Gauss 加性信道和 Laplace 加性信道; 信道码包括 Turbo 码、LDPC 码和 IRA 码等。在简单的、理想的信源信道情况下, 设计的 Slepian-Wolf 编/解码器能很好地逼近 Slepian-Wolf 理论极限。但是对于一些复杂的实际信号, 目前的 Slepian-Wolf 编码器和理论极限的差距还很大。

## 2. Wyner-Ziv 编码方案的实现

从应用的角度来看, 可以将 Wyner-Ziv 编码器看成由一个量化器与一个 Slepian-Wolf 编码器连接而成, 如图 5-40 所示。Wyner-Ziv 编码损失由量化损失和 Slepian-Wolf 编码损失两部分组成, 所以量化器和 Slepian-Wolf 编码器的设计均会影响 Wyner-Ziv 编码的性能。

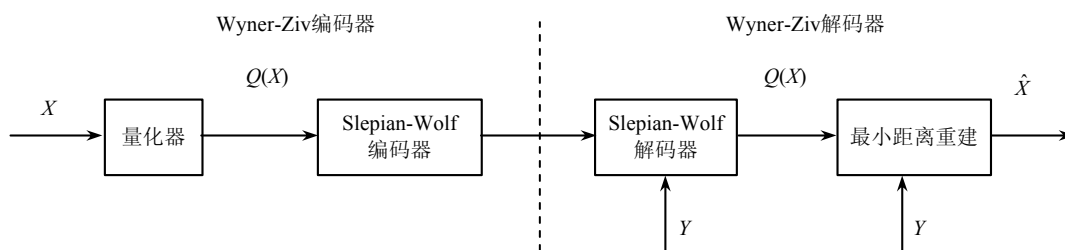


图 5-40 Wyner-Ziv 编码框架图

有损编码主要体现在量化部分, 它将连续信源映射到一个有限符号集, 这在某种程度上决定了编码器重建值的失真度, 因此许多学者对量化进行了研究, 包括嵌套的格子量化 (nested lattice codes, Zamir et al. 2002)、TCQ (Trellis-Coded Quantization, Yang et al. 2003) 和 SWC-NQ (Slepian-Wolf Coded Nested Quantization, Liu et al. 2004) 等。不过考虑到实际的复杂度和易用性, 目前大部分 Wyner-Ziv 编码器仍使用最简单的均匀标量量化。

在整个 Wyner-Ziv 编码器中, 最核心的部分仍然是 Slepian-Wolf 编码器, 其性能对整个独立编码、联合解码方式的压缩性能至关重要。而量化器的选择和设计也对整个率失真性能有着重要的影响。以下部分着重研究目前被广泛采用而且性能优越的基于 LDPCA 码的 Slepian-Wolf 编码方式。

针对传感器网络硬件资源不多、能耗提供受限等特点, 视频编码节点的编码设计不宜过于复杂, 因此采用联合编码、独立解码的视频分布式编码方案。这里主要研究基于不同域的分布式编码, 分别为基于分类的变换域 Wyner-Ziv 视频编码和基于空-时 MRF 模型的像素域视频分布式编码方案。

### 1) 基于分类的变换域的 Wyner-Ziv 视频编码方案

本部分的基于分类的变换域的进行 Wyner-Ziv 视频编码设计方案, 从现有的变换域 Wyner-Ziv 视频编码, 以及基于分类的变换域进行的 Wyner-Ziv 视频编码中编/解码框架的



设计、块分类、边信息的生成及解码端的码率估计等几方面进行介绍。

(1) 现有变换域视频编码技术。

在传统的非分布式信源编码方式中，从正交变换广泛的应用到分解信源向量及不同的系数谱中，不同的系数谱分别用尺度量化器编码和熵编码。Pradhan 和 Ramchandran 将变换编码引入到 Wyner-Ziv 编码中，并且分析了高斯模型下比特分配问题，Gastpar 等将 Karhunen-Loeve 变换 (KLT) 引入到分布式信源编码中，但是他们假设给定边信息下信源适量协方差矩阵不依赖边信息的值。这个方法的研究并不属于实际可行的编码方案。

Aaron 等人提出了基于 DCT 变换的方案,如图 5-41 所示。该方案首先对 W 帧进行 DCT 变换,然后对变换系数进行量化编码,通过 DCT 变换去除 W 帧的帧内空间冗余度。在解码端,则通过内插或外推技术得到 W 帧的预测帧,经过分块和 DCT 变换后组合成频带,作为边信息。各频带分别解码后,重新组合,进行逆 DCT 变换,重建当前帧。由于做了 DCT 变换,复杂度也相应提高;不过与传统帧间编码相比,其复杂度仍然很低,仍然适合用于无线传感器网络。

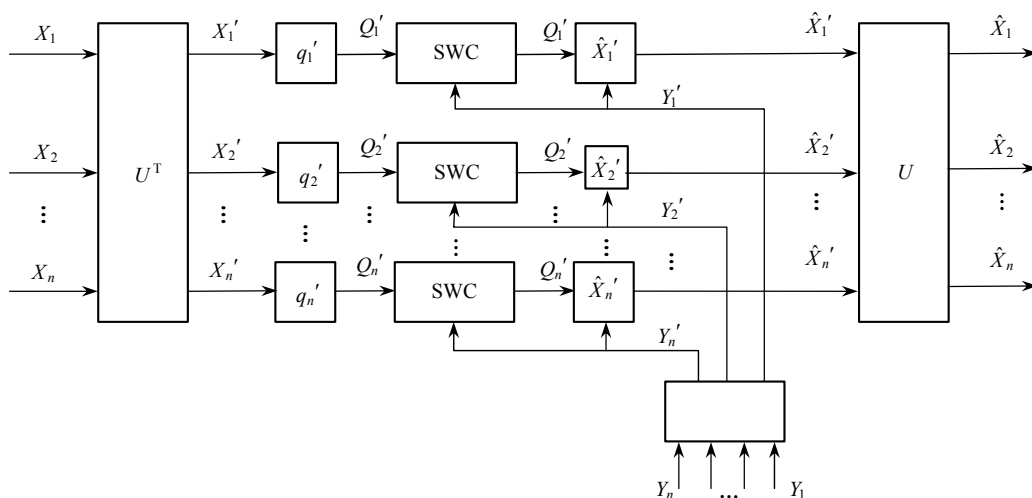


图 5-41 变换域中的 Wyner-Ziv 编码方案

在分布式视频系统的解码端, 需要边信息的辅助然后重构 WZ 帧, 又因为是分布式单视点视频编码, 所以只能从时间方向上生成边信息, 这里简称边信息。假设输入视频序列为  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ , 其中  $N$  表示输入视频序列的长度。序列由奇数帧  $X_{2i+1}$  和偶数帧  $X_{2i}$  组成, 定义奇数帧为 Wyner-Ziv 帧 (WZ 帧), 偶数帧为关键帧 (K 帧)。在分布式视频编码中的边信息用于在解码端进行 Turbo 解码和像素重建, 它是对当前 WZ 帧的预测近似, 其预测精度越高, 说明边信息与该 WZ 帧越接近, 从而进行 Turbo 解码所需的校验码就越少, 码率相应就越低。此外, 进行 Turbo 解码得到的只是 WZ 帧的量化信号, 还需经过重建才能恢复出 WZ 帧。而重建过程中也要用到边信息, 且边信息的预

```

graph LR
    W[W帧] --> Q[量化]
    Q --> E[编码]
    E --> B[缓冲]
    B -- "请求比特" --> E
    B --> D[解码]
    D -- "边信息" --> E
    D --> R[重建]
    R --> IDCT[IDCT]
    IDCT --> DW[解码W帧]
    DW --> IE[插值或外推]
    IE --> DCT[DCT]
    DCT --> R
    K[K帧] --> IEI[帧内编码]
    IEI --> D
    D --> IDI[帧内解码]
    IDI --> DK[解码K帧]
    DK --> IE
  
```

边信息的产生方法有很多种,最简单的方法是直接复制前一个已解码  $K$  帧作为边信息,称为关键帧复制法。稍微复杂一点的方法是前后关键帧平均法,即将其前后相邻的两个已解码的关键帧相同位置处的像素值直接进行平均,得到的值作为该位置处的边信息值。显然,视频中的物体运动比较剧烈,当画面内容变化较大,视频序列相邻帧间的相关性较低时,采用上面两种方法得到的边信息与原始  $WZ$  帧会有较大的误差。为提高边信息的质量。采用运动补偿内插法,将  $WZ$  帧的前后两帧作为参考帧进行运动估计和运动补偿来产生边信息。采用运动补偿内插法的分布式编码系统,其率失真性能要比平均值内插法提高  $1\sim 4\text{dB}$ 。

这里引入的视频编码方案是对 Aaron 等人提出的变换域 Wyner-Ziv 视频编码方案的改进，该方案采用块分类技术挖掘视频帧的空间非平稳的时间相关性，并利用分类信息来辅助解码端进行运动估计。分类信息体现了帧内各区域的运动情况，不仅可以用来粗略地分配码率，而且可以辅助运动估计以获取更准确的边信息，从而提高编码效率。根据 Wyner-Ziv 理论，各帧应独立编码、联合解码，也就是帧间的时间相关性应在解码端去除。

基于分类变换域的 Wyner-Ziv 视频编/解码框架如图 5-43 所示。

编码端将 W 帧（Wyner-Ziv 帧）分割成不重叠的块，对各块分别进行分类和 DCT 变换，类别不同的块的变换系数采取不同的编码方式。分类的目的是粗略估计各块的时间相关程度，即信源与边信息间的统计相关性。虽然编码器无法获取边信息，但可以获取信源与边信息之间的统计特性。编码器只需获取与边信息具有相似统计特性的参考帧  $F_{\text{er}}$ ，用 W 帧与参考帧间的统计相关性来近似信源与边信息之间的统计相关性，而无须获取边信息本身，这使得在编码端估计信源与边信息间的统计相关性是切实可行的。参考帧可以通过相邻帧来估计，其获取方法必须遵循两个原则：首先，参考帧必须具有与

边信息相似的统计特性；其次，获取参考帧的算法必须足够简单，以保证编码器的低复杂度要求。这里采用前后两帧的均值作为参考帧。通过比较当前帧与参考帧相应块的 SSD（差的平方和），将各块分为 skip 模式和 inter 模式两类。skip 模式的块不需编码传送，解码端直接用相应的边信息作为重建值；inter 模式的块的高频系数又分为丢弃、残差熵编码和直接熵编码三类。所有 inter 模式的块的低频系数组合成系数频带  $X_k$ ，其中  $k$  表示对各块变换系数进行 zig-zag 扫描时各系数的序号。对各频带进行均匀标量量化，量化符号分成  $M_k$  个比特面（bit-plane），各比特面依次送入 LDPCA 编码器进行编码，生成的校验位存储在发送缓存器中，每次传送一部分，由 LDPCA 解码器结合反馈信道来决定需传送多少校验位。由于视频数据是非平稳的，所以 W 帧与边信息之间的统计特性是动态变化的，各帧的压缩效率也会相应变化，因此码率的自适应调整成为优化编码的必要条件。图 5-43 中采用码率自适应的 LDPCA 码，为各比特面自适应地分配码率。

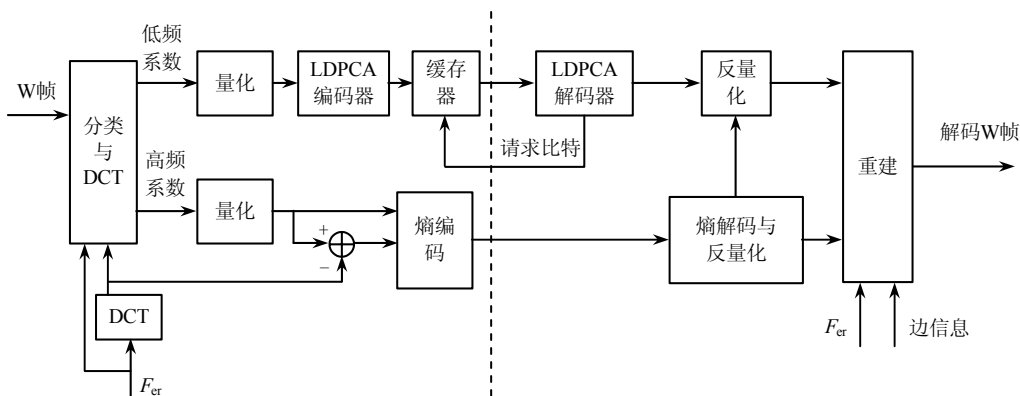


图 5-43 基于分类变换域的 Wyner-Ziv 视频编/解码框架

解码端首先解码分类信息以及 inter 模式块的高频系数。然后利用分类信息辅助运动估计，采用运动补偿内插技术生成 W 帧的边信息  $Y$ ；采用与编码端相同的方式将  $Y$  分割成块。对于 skip 模式的块，用  $Y$  的相应块作为重建值；对于 inter 模式的块，对  $Y$  的相应块进行 DCT 变换，各块的低频系数组合成频带  $Y_k$ ，作为频带  $X_k$  的边信息。假设  $X_k$  和  $Y_k$  的绝对差（即相关噪声）服从 Laplace 分布。对于每个频带，LDPCA 解码器从最高位比特面开始解码，每接收到一部分校验位，LDPCA 解码器就把接收到校验位和边信息相结合，尝试解码，如果解码失败，则通过反馈信道要求 LDPCA 编码器传送更多的校验位，然后重新解码，直到解码错误概率小于某个预先设定的阈值为止。

当所有比特面都解码后，它们又重新组合成量化符号，反量化后得到解码值  $\bar{X}$ 。变换系数由解码值和边信息联合重建，这样可以将重建失真限制在一定范围内，其上界由量化噪声决定。最后将重建的量化系数组合成块，进行逆 DCT 变换恢复当前帧。变换系数由解码值  $\bar{X}$  和边信息  $Y$  加权重建，其计算公式为

$$\hat{X} = \frac{\sigma_q^2}{\sigma_q^2 + \sigma_n^2} Y + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_q^2 + \sigma_n^2} \bar{X} \quad (5.89)$$

式中,  $\sigma_n^2$  为相关噪声的方差,  $\sigma_q^2$  为量化噪声的方差。

(3) 基于分类变换域的 Wyner-Ziv 视频编/解码中的块分类。

基于分类变换域的 Wyner-Ziv 视频编/解码中的块分类, 采用分类技术来区分帧内各区域的时间相关性, 为各块选择合适的编码方式。将当前帧  $X$  和参考帧  $F_{er}$  按相同的方式分割成不重叠的块, 并对各块进行分类。提取各块的运动特征作为分类的依据。

对于某一个块, 计算两者差的平方和  $SSD_1$ , 即

$$SSD = \sum_{v=1}^M \sum_{h=1}^N [B(v, h) - B_{er}(v, h)]^2 \quad (5.90)$$

式中,  $M \times N$  表示块的大小,  $B$  表示当前帧中的某块,  $B_{er}$  表示参考帧中的相应块。如果  $SSD_1$  比一个预先设定的阈值小, 则认为该块与边信息十分相似, 故不编码也不传输, 并标记为 skip 模式, 在解码端用边信息中的相应块来重建; 否则, 当前块被标记为 inter 模式。

Inter 模式的块可以进一步分类, 对  $B$  和  $B_{er}$  进行 DCT 变换, 变换系数按 zig-zag 方式扫描后分为低频系数和高频系数两部分, 然后计算  $B$  和  $B_{er}$  的高频系数间的  $SSD_2$ 。如果  $SSD_2$  小于某一个阈值, 则认为边信息中相应块的高频信息足够准确, 可以作为当前块高频系数的重建值, 因此这些块的高频系数将被丢弃, 即不编码和传输; 否则, 对高频系数进行熵编码, 并传送到解码端。然而, 当图像的重建质量要求较高时, 这个比例会急剧增大, 将会导致码率的膨胀, 甚至成为码率的主要组成部分。

为了降低传送高频系数的代价, 对高频系数进一步分类并采用不同的编码方式。当图像的重建质量较高时, 传送的高频系数所需的码率增大。由于某些块的高频系数与参考帧中相应块的高频系数具有较强的相关性, 而某些块的高频系数的相关性则很弱, 因此可通过比较  $SSD_2$  与另一个阈值的大小, 将这两部分高频系数加以区分, 从而挖掘更多的相关性以降低码率。对于第一类高频系数, 它们与参考帧中相应块的高频系数比较相似, 对它们的残差进行熵编码, 以去除两者之间的时间冗余; 对于第二类高频系数, 则直接进行熵编码。

(4) 基于分类变换域的 Wyner-Ziv 视频编/解码中的边信息生成。

在分布式编码中, 编码端无须知道边信息的具体值, 所以解码端在生成边信息时具有很大的灵活性。对于一个复杂度受限的解码器, 可以直接用已重建的相邻帧作为边信息, 其代价是需传送更多的校验位来纠错, 压缩效率比较低; 对于一个带宽受限的系统, 可以采用复杂的运动补偿技术获取高质量的边信息, 以减少解码所需的校验位, 降低码率; 对于一个低延迟系统, 所有帧按顺序解码, 所以解码端只利用前一帧或几帧, 通过运动补偿外推技术获取边信息, 也可以传送 hash 来辅助运动估计以获取更高质量的边信息。

将所有的奇数帧作为关键帧，所有的偶数帧作为 W 帧。对于第  $n$  个 W 帧  $F_{2n}$ ，解码端利用已解码的前后两个关键帧  $F_{2n-1}$  和  $F_{2n+1}$  采用运动补偿内插技术生成  $F_{2n}$  的边信息。以最小化绝对差的和 (SAD) 为匹配准则，对  $F_{2n-1}$  和  $F_{2n+1}$  进行运动估计，得到每块的运动矢量  $MV$ ，假设运动是均匀线性的，则  $F_{2n}$  相对于  $F_{2n-1}$  的运动矢量就是  $MV/2$ 。由于在块匹配的过程中，总是以 SAD 最小为最佳运动矢量的选择标准，并不是总能反应实际运动情况，从而导致推导的  $F_{2n}$  的某些运动矢量出错。为了纠正错误的运动矢量，利用相邻块的运动矢量具有一定的空间相关性的特点，采用空间运动滤波方法，对运动搜索得到的运动矢量进行中值加权滤波。

采用的基于空间滤波的运动补偿内插技术如图 5-44 所示。

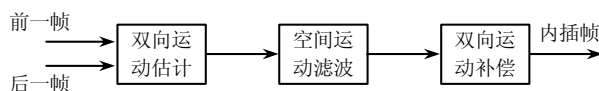


图 5-44 基于空间滤波的运动补偿内插技术

如果直接对  $F_{2n-1}$  和  $F_{2n+1}$  进行运动估计，得到  $F_{2n-1}$  的各块到  $F_{2n+1}$  的运动矢量，然后把  $F_{2n-1}$  的各块与由该块运动矢量连接的  $F_{2n+1}$  的相应块的值赋予  $F_{2n}$  的相应块，如图 5-44 所示，则会出现这种情况： $F_{2n}$  有些像素被赋予多个值，而有些像素则没有涉及。为避免这种情况，采用如图 5-44 所示的双向运动估计方法，保证运动矢量经过  $F_{2n}$  的每个不重叠块的中心。具体方法如下：假设  $F_{2n}$  相对于  $F_{2n-1}$  的运动矢量与  $F_{2n}$  相对于  $F_{2n+1}$  的运动矢量是对称的，记  $(i, j)$  为  $F_{2n}$  的某块  $B$ ， $(mv_i, mv_j)$  为运动矢量，则  $(i^n, j^n) = (i + mv_i, j + mv_j)$  表示  $F_{2n-1}$  中相应的块  $B_1$ ， $(i^n, j^n) = (i - mv_i, j - mv_j)$  表示  $F_{2n+1}$  中对应的块  $B_2$ 。对搜索范围中的所有可能的  $(mv_i, mv_j)$ ，分别计算  $B_1$  和  $B_2$  的 SAD，即

$$SAD = \sum_{(i,j) \in B} |B_1(i + mv_i, j + mv_j) - B_2(i - mv_i, j - mv_j)| \quad (5.91)$$

选择 SAD 最小的  $(mv_i, mv_j)$  作为  $B$  的最佳运动矢量。

影响双向运动估计性能的重要参数主要包括块大小、搜索范围和搜索步长。下面为各个宏块 (Macroblock，大小为  $16 \times 16$ ) 选择合适的运动搜索块大小；搜索范围则由各宏块的分类信息确定，分类信息体现了各块的运动量的大小，skip 模式表示该块的运动量较小，可以选择较小的搜索范围；inter 模式的运动量较大，根据高频系数是丢弃、进行残差熵编码还是直接进行熵编码依次选择增大的搜索范围；搜索步长 (指搜索过程中所有候选运动矢量的最小距离)，采用  $1/4$  像素精度的步长进行运动搜索。

由于宏块是按固定的大小  $16 \times 16$  分割的，其视频内容各不相同，涉及的物体运动情况也各异，有的宏块可能只包含一种运动，有的则可能包含几种不同的运动，由图 5-45 所示，采用两种块大小方式进行运动搜索，并自适应地为各宏块选择合适的方式。方式 1 把宏块作为一个整体进行运动估计，即运动搜索的块大小为  $16 \times 16$ ；方式 2 把宏块分成 4

个  $8 \times 8$  大小的块，各块分别进行运动估计。

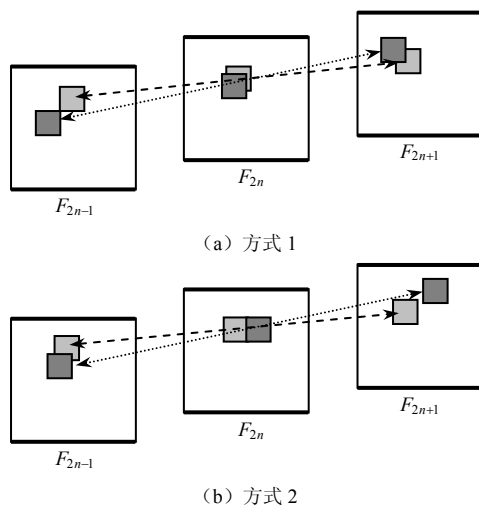


图 5-45 双向运动估计

运动搜索块的大小对运动矢量的估计有重要的影响。对于物体边界处的宏块，如图 5-46 所示的帽子边缘的色块，因帽子和背景的运动情况不同，也就是说运动矢量不同，若采用方式 1，把宏块作为一个整体在前后两帧中搜索匹配块，则得到的运动矢量不可能既刻画帽子的运动情况，又刻画背景的运动情况，为了获取宏块中不同物体各自的运动矢量，应该把宏块分为较小的块，使得运动情况不同的物体分离在不同的小块中，然后分别对各小块进行运动估计，即方式 2。对于周期重复出现区域的边界上的宏块，如图 5-46 所示的背景墙条纹上的色块，若采用方式 2，从前后两帧中搜索  $8 \times 8$  大小的匹配块，很可能出现跑飞的现象，即基于最小化前后两帧预测块的 SAD 的匹配准则确定的运动矢量并不是实际物体的运动轨迹，所以推导的  $F_{2n}$  的运动矢量出错；若采用方式 1，从前后两帧中搜索较大的匹配块，则出现运动跑飞现象的概率就会小得多。因此，必须为各宏块选择合适的搜索块大小，才能通过对前后两帧的双向运动估计准确获取  $W$  帧各区域的运动矢量。下面分别采用方式 1 和方式 2 对各宏块进行运动估计，然后选择匹配块 SAD 较小的那个方式下的运动矢量作为结果。考虑到方式 2 较易出现运动跑飞现象，虽然某小块的 SAD 很小，但得到的是错误的运动矢量，所以只有当方式 2 的 SAD 小于方式 1 的 SAD 的  $2/3$  时，才选择方式 2。



图 5-46 运动搜索块大小的影响

通过运动估计得到的运动矢量,有些出现了明显的错误,下面充分利用相邻块的运动矢量具有一定的空间相关性来滤除这些错误的运动矢量。把运动矢量  $(mv_i, mv_j)$  记为  $MV$ 。对于  $F_{2n}$  的某块  $B$ , 记定义加权矢量中值滤波 (Weighted Vector Median Filter, WVMF), 即

$$\sum_{k=1}^L w_k \|MV_{WVMF} - MV_k\| \leq \sum_{k=1}^L w_k \|mv_l - mv_k\|, \quad l=1,2,\dots,L \quad (5.92)$$

式中加权系数为

$$w_k = \frac{MSE(MV_c, B)}{MSE(MV_k, B)} \quad (5.93)$$

随着预测误差自适应地变化,  $MV_c$  为运动估计得到的当前块  $B$  的运动矢量,  $MV_1, \dots, MV_L$  为当前块  $B$  及其相邻块的运动矢量, 作为候选运动矢量,  $MV_{wvmf}$  为 WVMF 输出的结果运动矢量,  $MSE(MV_c, B)$  表示当运动矢量为  $MV_c$  时,  $X_{2n-1}$  的相应块  $B_1$  和  $X_{2n+1}$  的相应块  $B_2$  的均方差。WVMF 选择  $MV_{wvmf}$  作为当前块  $B$  的运动矢量的准则是最小化  $MV_{wvmf}$  与其他  $L-1$  个运动矢量的加权距离之和。由运动估计的算法可知, 预测误差较小的运动矢量对应的  $MSE$  较小, 相应的加权系数就比较大。WVMF 通过对预测误差和空间相关性的联合估计, 在相邻的  $L$  个运动矢量中选择一个最可能反应实际物体运动的矢量作为当前块的运动矢量。由于  $MV_c$  对应的  $MSE$  最小, 所以  $MT$  作为滤波结果的概率最大。因而, WVMF 只是纠正了部分出错的运动矢量, 大部分运动矢量不会发生改变。

经过双向运动估计和空间运动滤波后, 得到了  $F_{2n}$  的运动矢量场。  $F_{2n}$  可由  $F_{2n-1}$  和  $F_{2n+1}$  的均值预测, 即

$$Y_{2n}(i, j) = \frac{F_{2n-1}(i + mv_i, j + mv_j) + F_{2n+1}(i - mv_i, j - mv_j)}{2} \quad (5.94)$$

式中,  $mv_i$  和  $mv_j$  分别为像素的运动矢量的水平分量和垂直分量。

##### (5) 基于分类变换域的 Wyner-Ziv 视频编码中的解码端的码率估计。

由于视频数据是非平稳的,  $W$  帧和边信息之间的统计相关性是动态变化的, 各频带直至各比特面的压缩效率应该相应变化, 但编码端很难准确估计各比特面的码率。下面采用码率自适应的 LDPCA 码, 解码器结合反馈信道, 为各比特面自适应地分配码率。为了减少解码次数以降低解码复杂度, 在解码前先估计各比特面的码率的下限值  $R_{bound}$ , 当解码端接收到的校验位数小于  $R_{bound}$  时, 并不尝试解码, 而是直接向编码端发送反馈信息, 要求传送更多的校验位。

对于频带  $X_k$ , 解码端从其最高位比特面开始依次解码各比特面, 将已解码的比特面作为较低位比特面解码的边信息。记  $M_k$  为  $X_k$  的比特面数,  $X_{k,m}$  为  $X_k$  的第  $m$  个比特面,  $X_{k,M_k}$  为最高位比特面。假设频带的各系数间是统计独立的, 且较高位比特面已解码, 则

该比特面  $X_{k,m}$  的 Slepian-Wolf 极限为

$$\begin{aligned} R_{\text{bound}} &= H(X_{k,m} | Y_k, X_{k,M_k} X_{k,M_k-1} \cdots X_{k,m-1}) \\ &= \sum_l H(X_{k,m,l} | Y_{k,l}, X_{k,M_k,l} X_{k,M_k-1,l} \cdots X_{k,m-1,l}) \\ &= -\sum_l [p_l^0 \log(p_l^0) + p_l^1 \log(p_l^1)] \end{aligned} \quad (5.95)$$

式中

$$p_l^b = p(X_{k,m,l} = b | Y_{k,l}, X_{k,M_k,l} X_{k,M_k-1,l} \cdots X_{k,m-1,l}) = \sum_{z \in Z_m} \frac{1}{2} \alpha \exp(-\alpha |z - Y_{k,l}|) \quad b=0 \text{ 或 } 1$$

定义  $Z_m$  为  $X_k$  的第  $l$  个系数的所有可能取值的集合, 其二进制就表示有  $M_k$  个比特,  $m-1$  个较高位比特为已解码值  $X_{k,M_k,l} X_{k,M_k-1,l} \cdots X_{k,m-1,l}$ , 第  $m$  个比特即为  $b$  ( $b=0$  或  $1$ ), 较低位比特不确定。

解码器结合反馈信道的码率分配方式的缺点之一就是增加了解码复杂度。若设定解码前的估计码率下限为  $R_{\text{bound}}$ , 只有当接收到的校验位数大于  $R_{\text{bound}}$  时, 才开始解码, 则可有效减少各比特面尝试解码的次数, 大大降低了解码复杂度。

## 2) 基于空-时 MRF 模型的像素域视频分布式编码方案

基于空-时 MRF 模型的像素域视频分布式编码以现有像素域 Wyner-Ziv 视频编码方案为基础, 下面从编/解码框架设计、边信息生成、STMRF 模型及基于 MRF 模型的图像重建算法等几个方面进行介绍。

### (1) 现有像素域视频编码技术。

2002 年, Aaron 等人提出了基于像素域 Wyner-Ziv 的视频编码系统, 它是分布式视频编码方案中最简单的一种, 如图 5-47 所示。

该图中, 所有奇数帧作为 K 帧 (Key 帧), 采用传统的帧内编码技术, 所有偶数帧作为 W 帧 (Wyner-Ziv 帧), 采用分布式编码技术, 即帧内编码、帧间解码。W 帧的所有像素均匀量化后组合成一个码组, 并分成比特平面, 依次送入 Turbo 编码器, 生成的校验位暂存到发送缓冲器中, 根据解码端的需求每次传送一部分。解码端通过对已解码帧进行运动补偿内插或外推运算, 将得到当前帧的预测值作为边信息, 并与接收到的校验位结合, 进行迭代解码。从最高位比特面开始解码, 每收到一部分校验位, 解码器就尝试解码, 如果解码失败, 则通过反馈信道要求编码端传送更多的校验位, 然后重新解码, 这个解码—反馈的过程重复进行直到正确解码为止。Turbo 解码器结合反馈信道, 使得码率可以根据相关噪声的统计特性自适应地变化, 这对于统计特性随时间变化的视频序列来说是十分必要的。所有比特面都解码后, 又重新组合成量化符号, 与边信息相结合, 采用最小均方差准则重建当前帧。

这里引入一种基于像素域的 Wyner-Ziv 编/解码器方案, 其结构如图 5-48 所示。



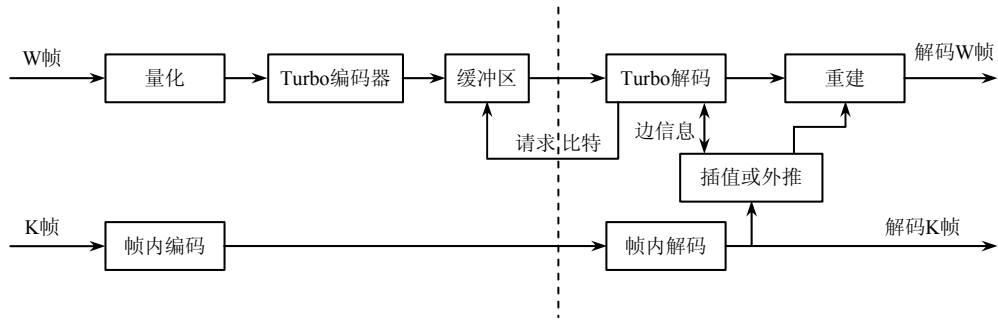


图 5-47 像素域 Wyner-Ziv 视频编码框架

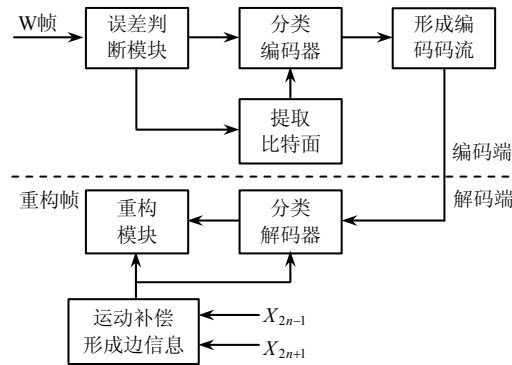


图 5-48 基于像素域的 Wyner-Ziv 编/解码器结构

对于输入的视频帧序列，首先从帧序列中提取奇数帧作为 K 帧，对于这部分帧，系统使用 H.264 全 I 帧编/解码方式进行处理，它们在解码端用来生成边信息；在这些固定的 K 帧之间的帧称为 W 帧，对于 W 帧，首先划分  $4 \times 4$  的块，并与相邻的两个 K 帧之间对应位置的  $4 \times 4$  块进行差别大小判断，设  $th$  表示差值的大小， $TH1$  和  $TH2$  表示既定的阈值，阈值的大小根据多次实验中重构图像的效果而定， $frame1$ 、 $frame2$  和  $frame3$  表示相邻的 3 帧。

对 W 帧进行编码时，首先对需要编码的 W 帧进行  $4 \times 4$  分块，并对每一块进行误差判断，计算出误差的绝对值  $th$  为

$$th = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \text{abs}[\text{frame3}(i, j) + \text{frame1}(i, j) / 2 - \text{frame2}(i, j)] \quad (5.96)$$

当  $th$  小于既定的阈值  $TH1$  时，则该块属于运动平缓类的块，运动平缓的类块的压缩比最大。这类块在解码端可以直接通过相邻 K 帧的运动补偿内插方法解码，不需要额外的编码信息，因此只编一个监督位，编码之后将监督位写入输出比特流中。当  $th$  在  $TH1$  与  $TH2$  之间时，则该块属于运动适中类的块，运动适中的类块压缩比较大。这类块在解码端通过相邻 K 帧的运动补偿内插方法解码时会存在少量的比特误差，从而需要在编码

时提供额外的编码信息。因此,对这类块采用 RS 码的编码方式,将编码后的监督位写入输出比特流中;当  $th$  大于  $TH2$  时,则该块属于运动激烈类的块,运动激烈的类块压缩比最小。这类块在解码端通过相邻  $K$  帧的运动补偿内插方法解码时会存在大量的比特误差。因此,对这类块编码时需要向输出码流中写入所有非全 0 和非全 1 的位平面。

当该  $4 \times 4$  块编码结束时,继续处理下一块,直到一帧图像编码结束为止。具体实现的编码器流程图如图 5-49 所示。

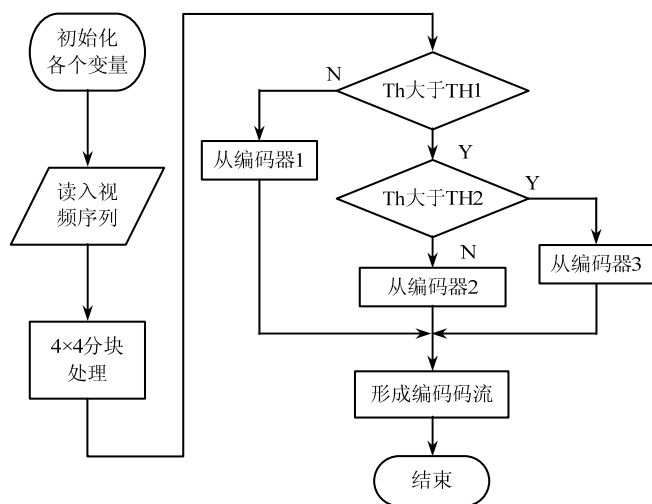


图 5-49 编码器流程图

在分布式视频编码的框架中,将复杂度很高的运动补偿转移到了解码端,这就使编码端的复杂度大大降低了,显然边信息生成的质量与压缩效果和恢复质量有着密切关系。边信息的生成方式有很多种,目前广泛应用运动补偿内插(MC-I)和运动补偿外推(MC-E)两种运动补偿技术。

① 运动补偿内插(MC-I)指一个偶数时间  $t$  的边信息通过使用  $t-1$  和  $t+1$  时刻的已经解码的关键帧来进行运动补偿内插。这种插入法包含对称的双向分组匹配,运动估值和分组运动补偿的平滑约束。因为内插需要下一个关键帧,帧被迫无序解码。

② 运动补偿外推(MC-E)指为产生偶数帧在时间  $t$  的边信息,使用分组匹配和平滑约束的方法,用已解码的  $t-2$  时刻的  $W$  帧和  $t-1$  时刻的  $K$  帧进行运动估值。因为使用已解码的  $W$  帧用于运动估值, $W$  帧重建时产生的错误会降低运动补偿的可靠性。但是,与 MC-I 相比,序列可以依照顺序来解码。

如图 5-50 所示,解码器实现过程中采用全搜索法生成边信息,它属于运动补偿内插技术的一种。对于  $W$  帧中的每一个  $4 \times 4$  块,利用相邻的已经解码的关键帧,进行范围为  $8 \times 8$  的搜索,得到当前块的运动矢量,根据运动矢量确定当前块在帧中的坐标,最后形成边信息。

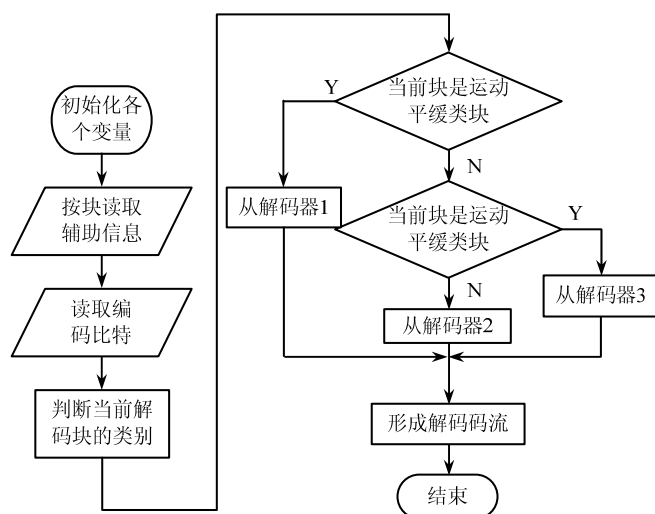


图 5-50 解码器流程图

根据  $4 \times 4$  块类别的不同，解码器采用不同的解码方式。首先，按  $4 \times 4$  块为单位读取边信息，同时从编码码流中读取相应的监督位。然后，根据监督位判读当前解码块的类别，如果解码块属于运动平缓类块，则直接用边信息来填充当前解码块，当解码块属于运动适中类块时，首先对边信息  $4 \times 4$  块进行提取位平面的处理，根据监督位，直接恢复出全 0 和全 1 的位平面，其他位平面采用 RS 码解码方式对边信息进行修正，假设边信息中有这样一个位平面，即

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

与之对应的监督位为 10110111 (B)，其本身的校验位为 00011011 (B)，两者比较即可发现，第一行与第二列对应的码元以及第三行与第一列对应的码元发生了错误，对其进行纠正，边信息位平面中的错误就得到了改正，于是得到正确的位平面为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

当解码块属于运动激烈类块时，使用从解码器 3，此时的解码区域正是图像中运动程度最大的区域。最后，在分类解码完成之后，根据数据块在帧中的坐标形成解码符号流。

一般来说，所有的奇数帧作为关键帧，所有的偶数帧作 W 帧 (Wyner-Ziv 帧)，解码端利用已解码的前后两个关键帧获取高质量的边信息，提高了 W 帧的压缩效率。然而，

由于关键帧的压缩效率较低而其数量却多达一半，所以整个系统的压缩效率并不高。为了提高系统的整体性能，理应增加 W 帧的比例，使得两个相邻关键帧间有多个 W 帧。把关键帧和该关键帧与下一关键帧之间的 W 帧看做一个 GOP (Group of Picture)。为了增加 W 帧的比例，应设置较大的 GOP。但是，对于较大的 GOP，由于前后两关键帧在时间上相隔较远，所以不宜将其作为参考帧进行运动补偿内插来生成 W 帧的边信息。另外，对于一个低延迟系统来说，要求视频帧按时间顺序解码，这样解码端只能进行前向运动估计。

这里引出一种具有低延迟特性并考虑系统的整体压缩效率的方案：在待编码的视频帧中等间隔的抽取一组帧作为关键帧，采用传统的帧内编码技术，将在相邻两关键帧之间的多个视频帧作为 W 帧，采用分布式编码技术，视频帧按照时间顺序进行编码。解码端对已解码的相邻的两帧（关键帧和/或 W 帧）进行前向运动估计，并把得到的运动场外推到当前 W 帧，然后进行运动补偿生成边信息。由于前向运动估计的准确度较低，所以通过运动补偿外推技术生成的边信息的质量不高，这会降低 W 帧的压缩效率。为了提高前向运动估计的准确度，用基于空-时 MRF (spatial-temporal MRF, STMRF) 模型的像素域分布式视频编/解码方案，在该解码过程中，利用解码信息同时估计运动场和灰度场，将运动估计、空间相关性估计与解码相结合，三者相互学习、相互影响，不断修正各自的信息，直至收敛。

## (2) 编/解码框架设计。

W 帧的编/解码框图如图 5-51 所示。编码端将 W 帧分割成不重叠的块，并对各块进行分类以粗略区分各块时间相关性的强弱。由于解码端只能进行前向运动估计，所以将前一帧作为参考帧，通过比较当前 W 帧的各块与前一帧相应位置处的块的 SSD，将各块分为 skip 模式和 inter 模式两类。其中，skip 模式的块不需编码传送，解码端直接用相应的边信息作为重建值；而将所有 inter 模式的块组合起来，分成比特面，根据用户对视频帧重建质量的要求，将  $m$  个较高位比特面依次送入 LDPCA 编码器进行编码，生成的校验位存储在发送缓冲区中，根据 LDPCA 解码器的要求每次传送一部分。

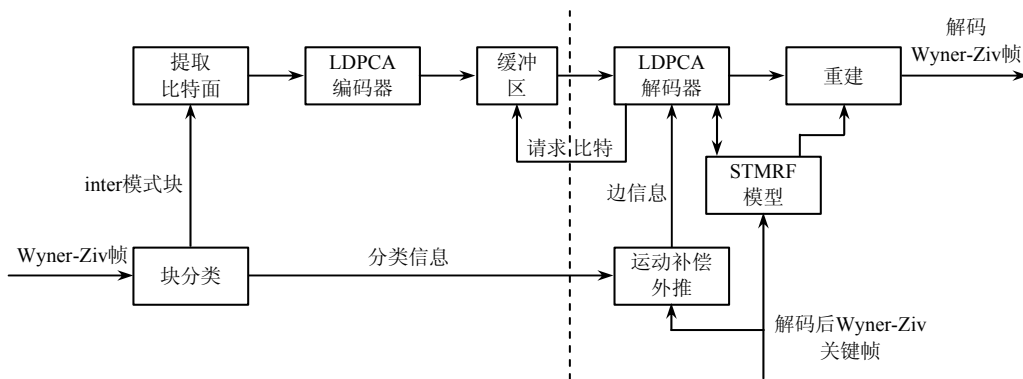


图 5-51 编/解码框架图

解码端首先解码各块的分类信息（即模式），然后利用分类信息辅助运动估计，采用运动补偿外推技术生成  $W$  帧的边信息  $Y$ 。将  $Y$  的所有 **inter** 模式的块组合起来，与接收到的校验位相结合，进行 LDPCA 解码。LDPCA 解码器从最高位比特面开始解码，结合反馈信道为每个比特面自适应地分配码率。在 LDPCA 解码过程中，解码端建立 STMRF 模型，利用 LDPCA 解码信息，对运动场和灰度场进行估计，得到各像素的局部统计特性，传递给 LDPCA 解码器重新进行解码，这个过程反复迭代进行，直至 LDPCA 解码收敛。当  $m$  个比特面都解码后，采用基于 MRF 模型的图像重建算法，对 **inter** 模式的块进行重建。对于 **skip** 模式的块，用  $Y$  的相应块作为重建值。

### （3）边信息的生成。

记  $F_t$  为当前  $W$  帧。解码端对已解码的  $F_{t-1}$  和  $F_{t-2}$  两帧进行运动补偿外推来生成  $F_t$  的边信息。如图 5-52 所示，对  $F_{t-2}$  和  $F_{t-1}$  进行前向运动估计：对于  $F_{t-1}$  的每块，在  $F_{t-2}$  中搜索一个匹配块以最小化两者的 SAD。由于分类信息体现了各块的运动量的大小，所以搜索范围可由该块的分类信息确定，对于运动量较小的 **skip** 模式的块，可以选择较小的搜索范围；对于运动量较大的 **inter** 模式的块，可选择较大的搜索范围。为了提高运动估计的精度，采用  $1/4$  像素精度的搜索步长。记  $(i, j)$  为  $F_{t-1}$  的某块  $B$ ， $(mv_i, mv_j)$  为从  $F_{t-2}$  到  $F_{t-1}$  的运动矢量， $(i', j') = (i - mv_i, j - mv_j)$  为  $F_{t-2}$  的匹配块  $B1$ ，假设运动是均匀线性的，则  $(i'', j'') = (i + mv_i, j + mv_j)$  为  $F_t$  与  $B$  匹配的块  $B2$ ，如图 5-52 所示。通过对  $F_{t-1}$  的运动矢量进行外推，得到  $F_t$  的运动场，有些像素可能被赋予多个运动矢量，而有些像素则可能没有涉及。对于尚未赋予运动矢量的像素，采用运动复制技术，即其运动矢量等于  $F_{t-1}$  中相同位置处的运动矢量。

由于运动矢量  $(mv_i, mv_j)$  是在  $F_{t-2}$  中搜索与  $B$  最匹配的块得到的，并不是总能反应实际运动情况，从而导致外推到  $F_t$  的运动矢量中有些是错误的。对得到的运动场进行空间滤波，以纠正部分错误的运动矢量。然后，对于  $F_t$  的每个像素  $F_t(h, v)$ ，若其运动矢量为  $(mv_h, mv_v)$ ，则将  $F_{t-1}(h + mv_h, v + mv_v)$  作为  $F_t(h, v)$  的边信息。如果某个像素被赋予了多个运动矢量，则将相应的多个预测值的均值作为边信息。

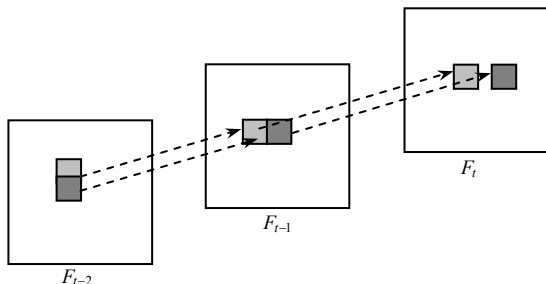


图 5-52 运动补偿示意图

#### (4) STMRF 模型。

Markov 模型是建立 STMRF 模型的基础。建立 Markov 模型的目的是估计图像的空间相关性。图像的 Markov 特性是指像素  $x_n$  的灰度值只与邻近像素有关，而与其他像素无关，即

$$p(x_n | x_l, l \neq n) = p(x_n | x_l, l \in N_n) \quad (5.97)$$

式中， $N_n$  表示像素  $x_n$  的邻近像素。 $p(x_n | x_l, l \in N_n)$  表征的是图像空间某位置的像素  $x_n$  与其邻近像素的相关关系，即图像的局部统计特性。下面引入两种不同的 Markov 模型来估计图像的局部统计特性：一种由状态转移概率定义的 Markov 模型，另一种则由 Gibbs 分布定义 MRF 模型。

##### ① 由状态转移概率定义的 Markov 模型。

当解码第  $k$  个比特面  $X^k$  时，把先前解码的比特面  $X^8 X^7 \cdots X^{k+1}$  与本次迭代过程中 LDPC 解码器对当前比特面  $X^k$  的判决结果重新组合成符号  $\{\hat{x}_n = x_n^8 x_n^7 \cdots x_n^{k+1} v_n\}$ ，看做是像素精度为  $8-k$  个比特的灰度图像  $\hat{X}$ 。在图像  $\hat{X}$  上建立 Markov 模型，估计 Markov 模型的状态转移概率，然后采用前向—后向 (Forward—Backward) 过程来估计各像素点的条件概率。

原则上说，一个统计均匀的图像的统计特性可由一个 Markov 过程来表示。然而，几乎所有的实际图像信号都不是统计均匀的，其统计特性通常是空间非平稳的，即空间不同位置处各不相同。为了挖掘图像空变的统计特性，将图像分割成不重叠的块，假设每块的统计特性是均匀的，采用一个 Markov 过程描述。先合理地选择块的大小  $B_h \times B_v$ ，这既保证各块的统计均匀性，又要保证各块有足够多的像素用来估计 Markov 模型。

状态转移概率反映了 Markov 模型的记忆特性，表征了图像的空间相关性的强弱。解码端对图像  $X$  的各块分别建立一个 Markov 模型，通过统计其高维直方图来估计相应的状态转移概率。下面以一阶 Markov 链为例，阐述状态转移概率的估计算法，如图 5-53 所示。

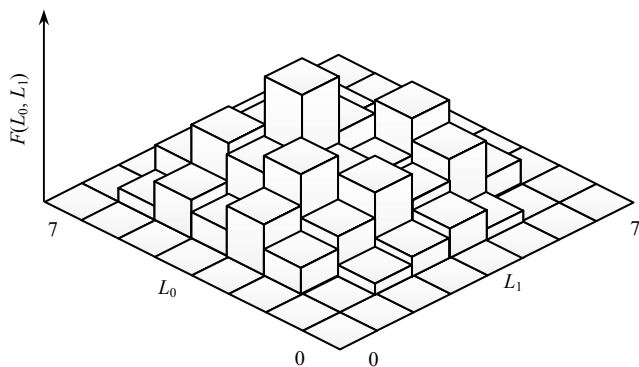


图 5-53 一阶 Markov 链对应的 2D 直方图

对一阶 Markov 链来说,需统计二维直方图。记  $L_0$  为像素  $x_n$  的灰度值,  $L_1$  为像素  $x_{n+1}$  的灰度值 ( $1 \leq n < N$ ),  $F(i, j)$  为 ( $L_0 = i, L_1 = j$ ) 出现的频率。 $(F(i, j))$  称为图像的 2D 直方图, 由此可得一阶 Markov 链的状态转移概率为

$$a_{ij} = \frac{F(i, j)}{\sum_i F(i, j)} \quad (5.98)$$

类似的, 对于 2D 一阶 Markov 模型来说, 则需统计 3D 直方图。

当解码第  $k$  个比特面  $X^k$  时,  $X$  的各像素  $\hat{x}_n = x_n^8 x_n^7 \cdots x_n^{k+1} v_n$  由  $8-k$  个比特组成, 由于  $v_n$  是 LDPC 解码某次迭代过程中的判决结果, 在正确解码之前,  $\{v_n\} \neq \{x_n^k\}$ , 所以根据  $X$  的值统计的直方图是真实信号  $\bar{X} = \{\hat{x}_n = x_n^8 x_n^7 \cdots x_n^{k+1} v_n\}$  的直方图的有噪形式。由于每块的像素数量有限, 导致直方图的有效值稀疏地分散在空间各点上, 如果真实信号  $X$  中存在某个组合 ( $L_0 = i, L_1 = j$ ), 而有噪的  $\hat{X}$  中无此组合, 则状态转移概率  $a_{ij} = 0$ , 这将会对前向—后向过程的演绎造成很坏的影响, 进而影响图像局部统计特性的估计准确度。为了降低有噪的稀疏直方图对估计状态转移概率的影响, 采用 Parzen 窗对直方图进行平滑, 使有效点的值延伸到周围的零点。

记  $Z_s = (L_0 = i, L_1 = j)$  为 2D 直方图中的非零值,  $z = (L_0 = i', L_1 = j')$  为直方图中的零点, 则 Parzen 窗把  $Z_s$  的值扩展到  $z$  点的值为

$$\hat{F}(z) = \frac{1}{w^d} K\left(\frac{1}{w}(z - Z_s)\right) \quad (5.99)$$

式中,  $w$  表示窗口大小,  $d$  为直方图的维数,  $K()$  为核函数。我们采用标准多维高斯密度函数作为核函数, 即

$$K(z) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} z^T z\right) \quad (5.100)$$

并选择优化的窗口大小为

$$w = \sigma \left[ \frac{4}{L(2d+1)} \right]^{1/(d=4)} \quad (5.101)$$

式中,  $L$  为直方图的所有点的个数,  $\sigma^2$  为直方图的方差。

解码端估计的状态转移概率依赖于 LDPC 解码器对当前比特面的判决结果, 在当前比特面正确解码前, 往往不能完全正确地反映真实信号的统计特性, 因而在每次迭代过程中, 都应利用更新后的 LDPC 解码信息, 重新估计状态转移概率。随着 LDPC 解码信息的不断修正, Markov 模型可以获取越来越准确的状态转移概率, 使得估计的各像素点的条件概率更接近原图像的空间相关性, 从而加速 LDPC 解码的收敛。

② 由 Gibbs 分布定义的 MRF 模型。

首先, 由解码端估计原图像, 然后在估计的图像上建立 MRF (Markov Random Field)

模型, 根据 MRF-Gibbs 等价性, 把各像素点的局部条件概率的计算转化为势能函数的计算。

由于解码端不知原图像  $X$  的值, 不能直接在原图像上建立 MRF 模型以估计其空间相关性, 因此解码端必须先估计图像, 然后在估计的图像上建立 MRF 模型。基于最小均方差 MMSE 准则, 结合边信息  $Y$ 、先前解码的较高位比特面  $X^8 \ X^7 \cdots X^{k+1}$  和当前比特面  $X^k$  的 LDPC 解码信息  $g_n$ , 得到各像素值的优化估计为

$$\hat{x}_n = \sum_{x \in \Gamma} xp(x | y_n) = \sum_{x \in \Gamma} xp(x)p(y_n | x) \approx \sum_{x \in \Gamma} xg_n(x_n^k = b)p(y_n | x) \quad (5.102)$$

式中,  $\Gamma = [\bar{x}_n \cdot q \ \bar{x}_n \cdot q + q]$ ,  $\bar{x}_n = x_n^8 x_n^7 \cdots x_n^{k+1}$ ,  $q = 2^k$  为由已解码的较高位比特面确定的像素  $x_n$  的取值范围。

MRF 模型假设各像素点的灰度值只与其邻域的像素值有关, 而与其他像素无关, 即

$$p(x_{h,v} | x_{h',v'}, (h', v') \neq (h, v)) = p(x_{h,v} | x_{h',v'}, (h', v') \in N_{(h,v)}) \quad (5.103)$$

式中,  $N_{(h,v)}$  为空间位置  $(h, v)$  处的像素  $x_{h,v}$  的邻域像素集合。像素  $x_{h,v}$  与其他像素的空间相关性表现为图像中空间位置  $(h, v)$  处的局部统计特性, 直接估计各像素的条件概率是一件很难处理的事情, 幸好 Hammersley and Clifford (1971) 发现了 MRF-Gibbs 分布的等价性, 为 MRF 的估计提供了解决办法, 即转化为 Gibbs 分布的计算。随后 Grimmett (1973)、Besag (1974) 和 Moussouris (1974) 分别从理论上证明了 MRF-Gibbs 分布的等价性。

根据 MRF-Gibbs 分布等价性原理, 像素  $x_{h,v}$  的局部条件概率可以用 Gibbs 分布表示为

$$p(x_{h,v} | x_{h',v'}, (h', v') \in N_{(h,v)}) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\frac{1}{T} U(x_{h,v} | x_{h',v'}, (h', v') \in N_{(h,v)})\right) \quad (5.104)$$

式中,  $T$  为温度参数,  $Z$  为归一化常数, 即

$$Z = \sum_{x_{h,v}} \frac{1}{Z} \exp\left(-\frac{1}{T} U(x_{h,v} | x_{h',v'}, (h', v') \in N_{(h,v)})\right) \quad (5.105)$$

又称为分割函数 (Partition Function)。 $U(x_{h,v} | x_{h',v'}, (h', v') \in N_{(h,v)}) = \sum_c V_c(x_{h,v})$  为像素  $x_{h,v}$

的邻域中所有团 (clique) 的势能函数 (Potential Function) 之和, 通常称为能量函数 (Energy Function)。像素的条件概率取决于邻域结构和 clique 的势能函数的定义。像素  $x_{h,v}$  的  $r$  阶邻域结构定义为

$$N_{(h,v)}^r = \{(h', v') | (h - h')^2 + (v - v')^2 \leq r, (h', v') \neq (h, v)\} \quad (5.106)$$

MRF 的邻域结构如图 5-54 所示, 其中图 5-54 (a) 表示一阶邻域结构, 由 4 个邻域像素组成; 图 5-54 (b) 表示二阶邻域结构, 由 8 个邻域像素组成; 图 5-54 (c) 表示四阶邻域结构, 由 12 个邻域像素组成。

clique 是邻域结构  $N_{(h,v)}^r$  中相邻像素的组合, clique 中任意两像素在  $N_{(h,v)}^r$  中都是相邻的。若  $x_{h',v'}$  和  $x_{h'',v''}$  属于同一个 clique, 则必有  $(h', v') \in N_{(h'',v'')}^r$ ,  $(h'', v'') \in N_{(h',v')}^r$ 。



单个像素点也是一个 clique。图 5-54 (a) 是一阶邻域的所有 clique 的形状, 图 5-54 (b) 是二阶邻域所有 clique 的形状。显然, 一阶邻域的 clique 集合是二阶邻域的 clique 集合的子集。随着邻域结构的阶数  $r$  的增大, clique 的数目将成指数倍增加, clique 的结构也会变得比较复杂, 不过比较大的邻域结构可以挖掘更多像素间的局部统计特性。因而, 在实际应用中, 应折中选择合适的  $r$  和 clique 的形状。

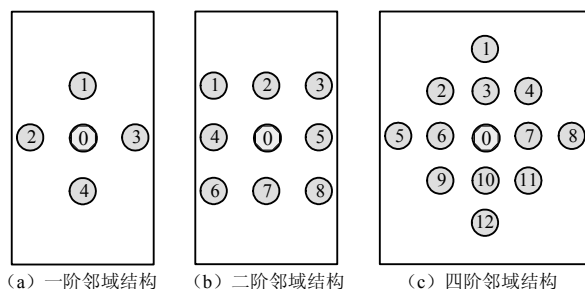


图 5-54 MRF 的邻域结构

clique 的势能函数表征了属于该 clique 的像素间的约束关系, 对于越不可能出现的像素组合, 赋予越大的势能函数值; 对于很可能出现的像素组合, 则应赋予较小的势能函数值。如图 5-55 (b) 所示, 采用二阶邻域结构, 假设像素的灰度值只与其 8-邻域像素有关, 而与其他像素无关。二阶邻域结构的所有 clique 的形状如图 5-55 (b) 所示, 假设除了由两个像素组成的 clique 以外, 其他 clique 的势能函数均为零。为了刻画图像的空间相关性, clique 的势能函数的定义应综合考虑平滑、边界以及相邻像素的局部依赖性等约束关系。二十多年来, MRF 模型在图像处理和分析的各个领域中得到了广泛的应用, 尽管采用 MRF 模型的目的是估计图像的空间相关性, 但是对于不同的图像和不同的应用, 应设计不同形式的 clique 势能函数, 才能有效地估计各像素的概率分布。考虑到图像的平滑性以及边的存在, 平滑区域的像素相差越大, 相应的 clique 的势能函数值就越大, 而在边缘两侧的像素的依赖性应减弱, 由此设计了具有 DA (Discontinuity Adaptive) 特性的势能函数为

$$V(x_{h,v}, x_{h',v'}) = \log \left[ 1 + \frac{(x_{h,v} - x_{h',v'})^2}{\delta^2} \right] \quad (5.107)$$

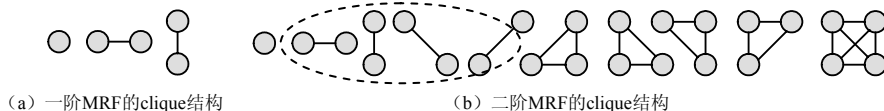


图 5-55 clique 结构

令  $d = x_{h,v} - x_{h',v'}$ , 当  $\delta^2$  取不同值时,  $V(d) = \log[1 + d^2 / \delta^2]$  的曲线如图 5-56 所示。当  $d$  的值较小时,  $V(d) \approx O(d^2)$ ; 当  $d$  的值较大时,  $V(d) \approx O(d)$ 。所以上式定义的势能

函数既符合平滑约束条件, 又能保留可能存在的边。对于较小的  $\delta^2$ ,  $V(d)$  的值随着  $d$  的值增大急剧增加; 对于较大的  $\delta^2$ ,  $V(d)$  的值随着  $d$  的值的增大缓慢增加。因而, 在平滑区域,  $\delta^2$  应设置较小值, 赋予不同大小的  $d$  值的代价差别较大; 在边的两侧,  $\delta^2$  应设置较大值, 赋予不同大小的  $d$  值的代价差别不是很大。

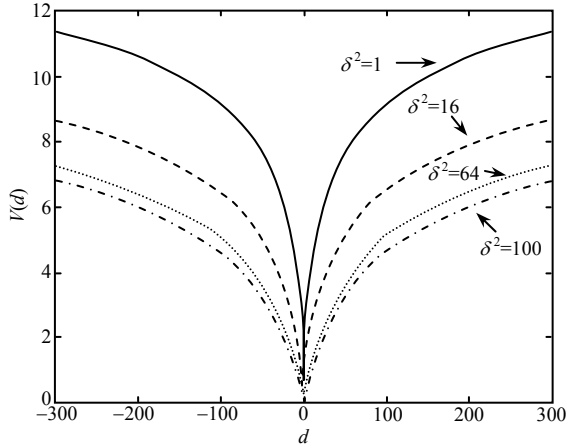


图 5-56  $V(d)$  曲线

图像的估计值  $\hat{X}$  的  $(8-k)$  个较高位比特面由先前解码的  $X^8 X^7 \cdots X^{k+1}$  确定, 而  $k$  个较低位比特面则依赖于 LDPC 解码信息  $g_n$  和边信息  $Y$  每个像素的  $2^k$  个可能的取值。在当前比特面  $X^k$  正确解码前计算的各像素的局部条件概率, 往往不能完全正确地反映真实信号的统计特性, 因而在每次迭代过程中, 都应利用更新后的 LDPC 解码信息, 重新估计图像。LDPC 解码信息越准确, 估计值  $\hat{X}$  越接近原图像  $X$ , 建立在  $\hat{X}$  上的 MRF 模型获取的各像素点的条件概率就越能准确反应原图像  $X$  的空间相关性。在下次迭代过程中, LDPC 解码器利用从 MRF 节点得到各像素点的更加准确的先验信息进行解码, 加速了收敛, 减少了正确解码所需的校验位, 从而提高了压缩效率。

### ③ STMRF 模型估计。

建立 STMRF 模型的目的是估计  $W$  帧的局部统计特性, 即像素  $F_t(h, v)$  的条件概率为

$$p(F_t(h, v) | F_{t-1}, F_{t-2}, \cdots, F_1, F_t(h', v'), (h', v') \neq (h, v)) \quad (5.108)$$

它不仅与帧内的其他像素有关, 还与其他帧  $F_{t-1}, F_{t-2}, \cdots, F_1$  有关。根据图像的 Markov 性和 Bayesian 公式, 上述公式可转换为

$$\begin{aligned} & p(F_t(h, v) | F_{t-1}, F_{t-2}, \cdots, F_1, F_t(h', v'), (h', v') \neq (h, v)) \\ & \propto p(F_t(h, v) | F_t(h', v'), (h', v') \in N_{(h, v)}) p(F_{t-1}(h'', v'') | F_t(h, v)) \end{aligned} \quad (5.109)$$

式中,  $N_{(h, v)}$  为像素  $F_t(h, v)$  的空间邻域像素集合,  $p(F_t(h, v) | F_t(h', v'), (h', v') \in N_{(h, v)})$  表征了当前帧  $F_t$  的空间相关性,  $p(F_{t-1}(h'', v'') | F_t(h, v))$  表征了当前帧  $F_t$  与前一帧  $F_{t-1}$  的时间相关性, 它与  $F_{t-1}(h'', v'')$  到  $F_t(h, v)$  的运动矢量有关, 为了简化问题, 假设一阶时间记忆性,

即  $F_t$  的灰度值仅与前一帧  $F_{t-1}$  有关, 而与  $t-2$  时刻以前的视频帧  $F_{t-2}, \dots, F_1$  无关。

解码端不知道当前帧  $F_t$  的灰度值, 所以在估计其局部统计特性之前, 必须先利用 LDPCA 解码信息和边信息, 得到  $F_t$  的估计值  $\hat{F}_t$ , 在 LDPC 解码收敛之前, LDPCA 解码信息并不准确, 所以对  $\hat{F}_t$  和  $F_{t-1}$  进行运动估计得到的运动矢量也不准确。因而, 下面并不直接计算各像素的运动矢量, 而是估计运动矢量的所有可能取值的概率, 即概率运动场, 记  $(mv_h, mv_v)$  为像素  $F_t(h, v)$  的运动矢量的一个可能取值, 则

$$\begin{aligned} & p(F_{t-1}(h, v) | \hat{F}_t(h, v)) \\ &= \sum_{(mv_h, mv_v)} p(mv_h, mv_v) p(F_{t-1}(h + mv_h, h + mv_v) | \hat{F}_t(h, v), (mv_h, mv_v)) \end{aligned} \quad (5.110)$$

这样, 可以得到

$$\begin{aligned} & p(F_t(h, v) | F_{t-1}, F_{t-2}, \dots, F_1, F_t(h', v'), (h', v') \neq (h, v)) \propto \\ & \sum_{(mv_h, mv_v)} p(mv_h, mv_v) p(F_{t-1}(h + mv_h, h + mv_v) | \hat{F}_t(h, v), (mv_h, mv_v)) \\ & \cdot p(F_t(h, v) | F_t(h', v'), (h', v') \in N_{(h, v)}) \end{aligned} \quad (5.111)$$

$$\begin{aligned} & p((mv_h, mv_v) | F_{t-1}(h + mv_h, h + mv_v), \hat{F}_t(h, v)) \\ &= p(mv_h, mv_v) p(F_{t-1}(h + mv_h, h + mv_v) | \hat{F}_t(h, v), (mv_h, mv_v)) \end{aligned} \quad (5.112)$$

则 W 帧的局部统计特性转化为  $p(F_t(h, v) | F_t(h', v'), (h', v') \in N_{(h, v)})$  和  $p((mv_h, mv_v) | F_{t-1}(h + mv_h, h + mv_v), \hat{F}_t(h, v))$  的计算。因而, STMRF 模型的估计可以转化为两个 MRF 的估计。而灰度场的空间相关性的估计, 根据 MRF-Gibbs 分布的等价性, 将  $p(F_t(h, v) | F_t(h', v'), (h', v') \in N_{(h, v)})$  的计算转化为 clique 势能函数的计算。

由于相邻像素很可能属于同一个运动物体, 它们的运动矢量具有很强的相关性, 所以运动场也可以用 MRF 模型来刻画。根据 MRF-Gibbs 分布的等价性,  $p((mv_h, mv_v) | F_{t-1}(h + mv_h, h + mv_v), \hat{F}_t(h, v))$  可以转化为

$$\begin{aligned} & p((mv_h, mv_v) | F_{t-1}(h + mv_h, h + mv_v), \hat{F}_t(h, v), (mv_{h'}, mv_{v'}), (h', v') \in N_{(h, v)}) \\ &= \frac{1}{Z} \exp \left( -\frac{1}{T} \left( U((mv_h, mv_v) | (mv_{h'}, mv_{v'}), (h', v') \in N_{(h, v)}) \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + U(F_{t-1}(h + mv_h, h + mv_v) | \hat{F}_t(h, v), (mv_{h'}, mv_{v'})) \right) \right) \end{aligned} \quad (5.113)$$

式中,  $T$  为温度参数

$$Z = \sum_{(mv_h, mv_v)} \exp \left( -\frac{1}{T} \left( U((mv_h, mv_v) | (mv_{h'}, mv_{v'}), (h', v') \in N_{(h, v)}) \right. \right. \\ \left. \left. + U(F_{t-1}(h + mv_h, h + mv_v) | \hat{F}_t(h, v), (mv_{h'}, mv_{v'})) \right) \right) \quad (5.114)$$

$$U((mv_h, mv_v) | (mv_{h'}, mv_{v'}), (h', v') \in N_{(h, v)}) = \sum_c V_c(mv_h, mv_v) \quad (5.115)$$

$$\begin{aligned}
 & U(F_{t-1}(h + mv_h, h + mv_v) | \hat{F}_t(h, v), (mv_{h'}, mv_{v'})) \\
 & = (F_{t-1}(h + mv_h, h + mv_v) - \hat{F}_t(h, v))^2
 \end{aligned} \quad (5.116)$$

从而把运动场的估计转化为 clique 的势能函数  $V_c(mv_h, mv_v)$  的计算。

考虑运动场的二阶邻域结构, 假设除了由两个像素组成的 clique 以外, 其他 clique 的势能函数均为零。定义两点 clique 的势能函数为

$$V((mv_h, mv_v), (mv_{h'}, mv_{v'})) = |mv_h - mv_{h'}| + |mv_v - mv_{v'}| \quad (5.117)$$

上述的 STMRF 模型估计与 LDPCA 解码交互迭代进行, STMRF 模型利用 LDPCA 解码信息和边信息估计当前帧的灰度值  $\hat{F}_t$ , 然后估计运动场和灰度场, 估计各像素点的局部统计特性 (时间相关性和空间相关性), 传递给 LDPCA 解码器。随着迭代的进行, LDPCA 解码器若获得当前帧  $F_t$  的更准确的信息, STMRF 模型就可以更准确地估计运动信息和灰度信息, 获取更精确的局部统计特性, 从而加速 LDPCA 解码的收敛, 减少正确解码所需的校验位, 降低码率。

STMRF 模型的建立使得解码端可以根据解码信息不断学习并修正运动场和灰度场, 逐渐提高运动估计的准确度, 减少了用于纠错的校验位数, 提高了压缩效率。

#### (5) 基于 MRF 模型的图像重建算法。

当  $m$  个比特面  $X^8 X^7 \cdots X^{9-m}$  都解码后, 重新组合成量化符号  $\bar{x}_n = x_n^8 x_n^7 \cdots x_n^{9-m}$ 。解码端利用解码值  $\bar{x}_n$  和边信息  $y_n$ , 基于 MMSE 准则优化估计各像素值为

$$\hat{x}_n = E\{x_n | \bar{x}_n, y_n\} = \left\{ \sum_{x_n \in \Gamma} x_n p(x_n | y_n) \right\} \quad (5.118)$$

式中,  $\Gamma = (\bar{x}_n \cdot \Delta, \bar{x}_n \cdot \Delta + \Delta)$ ,  $\Delta = 2^{8-m}$  为由已解码值确定的像素  $x_n$  的取值范围, 根据贝叶斯公式把后验概率  $p(x_n | y_n)$  转化为先验概率和条件概率的积, 即

$$p(x_n | y_n) = p(x_n | x_l, l \in N_n) p(y_n | x_n) \quad (5.119)$$

式中,  $p(x_n | x_l, l \in N_n)$  为像素  $x_n$  的局部统计特性,  $p(y_n | x_n)$  由相关噪声的统计特性确定。

上述方案采用模拟退火算法, 在某个温度  $T$  下, 估计各像素值, 然后降低温度  $T$ , 重新估计各像素值, 直至收敛, 从而最小化了整个图像的能量函数。

本节主要针对分布式编码的基础理论、分布式编码的实现及视频分布式编码的论述, 重点讨论了基于像素域 Wyner-Ziv 视频编码、基于分类的变换域 Wyner-Ziv 视频编码, 以及基于空-时 MRF 模型的像素域视频分布式编码几种视频分布式编码实现方式。由此表明, 基于像素域 Wyner-Ziv 视频编码压缩编码性能同传统方法相比, 压缩性能提高了许多; 基于分类的变换域 Wyner-Ziv 视频编码充分利用了视频帧的空间非平稳的时间相关性, 与现有的变换域分布式视频编码方案相比, 获得了更高的压缩效率; 基于空-时 MRF 模型的像素域视频分布式编码适用于低延迟系统, 且可设计较长的 GOP 结构, 从而提高

了系统的整体性能。

分布式编码应用技术的研究尚处于探索阶段，离实用还有较大的距离，尚有许多难题亟待解决。尽管如此，分布式视频编码技术在无线传感器网络中以其编码的低复杂度和高压缩率等良好的性能，得到了广泛的关注，同时也取得了不错的成果。

## 5.4 大数据技术

无线传感器的广泛使用使得数据采集更加方便，这些传感器会连续不断地产生数据，如实时监控系统、网络流量监测等。这些数据最大的特点就是海量，它们每时每刻都在连续不断地产生，但与其他海量数据有所不同，这些数据连续有序、变化迅速，而且对其处理分析的响应度要求较高，因此对于此类数据的处理和挖掘往往采用不同的方法。应用大数据技术可以很好地解决海量数据带来的问题，下面将对大数据技术进行简单阐述。

### 5.4.1 大数据的基本概念

#### 1. 大数据的概念

大数据本身是一个比较抽象的概念，单从字面来看，它表示数据规模的庞大。但是仅仅数量上的庞大显然无法看出大数据这一概念和以往的“海量数据”、“超大规模数据”等概念之间有何区别，维基百科对大数据的定义简单明了：大数据是指利用常用软件工具捕获、管理和处理数据所耗时间超过可容忍时间的数据集。当前在大数据定义问题上很难达成一个完全的共识，这点与云计算的概念刚提出时的情况相似。我们认为，在面对实际问题时，不必过度地拘泥于具体的定义之中，因为不同的定义基本是从大数据的特征出发的，应该更多地关注大数据定义所给出的具体特征。

#### 2. 大数据的特征

大数据的特征比较具有代表性的是 3V，即认为大数据需满足三个特点：规模性（Volume）、多样性（Variety）和高速性（Velocity）。除此之外，还有提出 4V 定义的，即尝试在 3V 的基础上增加一个新的特性。关于第 4 个 V 的说法并不统一，国际数据公司（IDC）认为大数据还应当具有价值性（Value），大数据的价值往往呈现出稀疏性的特点。而 IBM 认为大数据必然具有真实性（Veracity）。下面分别介绍这几个主要特征。

（1）Volume，指数据量巨大。体量大是大数据区别于传统数据最为显著的特征。一般关系型数据库处理的数据量在 TB 级，大数据所处理的数据量通常在 PB 级以上。

（2）Variety，指数据类型多。大数据所处理的计算机数据类型早已不是单一的文本形式或者结构化数据库中的表，它包括订单、日志、BLOG、微博、音频和视频等各种复杂结构的数据。

(3) Velocity, 指数据流动快。速度是大数据区别于传统数据的重要特征。在海量数据面前, 需要实时分析获取需要的信息, 因为处理数据的效率就是组织的生命。

(4) Value, 指数据潜在价值大。在研究和技术开发领域, 上述三个特征已经能够表征大数据的特点。但在商业应用领域, 还有第四个关键的特征, 即投入如此巨大的研究和技术开发的努力, 应为大家洞察到大数据潜在的巨大价值。如何通过强大的机器学习和高级分析, 更为迅速地完成数据价值的提取, 挖掘大数据的潜在价值, 是亟须解决的难题。

(5) Veracity, 指数据真实准确。只有真实、准确的数据才是有价值的信息, 这是信息系统建设的重要一面, 也是用户容易忽略的问题。对传统的数据仓库和数据信息可以进行管控和审计, 但是针对大数据如何做到这一点, 也是大数据应用中的重要问题。

## 5.4.2 大数据处理框架

### 1. 大数据的处理模式

大数据的应用类型有很多, 主要的处理模式可以分为流处理 (stream processing) 和批处理 (batch processing) 两种。批处理是先存储后处理 (store-then-process), 而流处理则是直接处理 (straight-through processing)。

#### 1) 流处理

流处理的基本理念是数据的价值会随着时间的流逝而不断减少, 因此尽可能快地对最新的数据作出分析并给出结果是所有流数据处理模式的共同目标。对于需要采用流数据处理的大数据应用场景主要有网页点击数的实时统计、传感器网络和金融中的高频交易等。

流处理的处理模式将数据视为流, 源源不断的数据组成了数据流。当新的数据到来时就立刻处理并返回所需的结果。图 5-57 是流处理中基本的数据流模型。

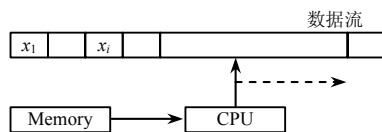


图 5-57 基本的数据流模型

数据的实时处理是一个很有挑战性的工作, 数据流本身具有持续达到、速度快且规模巨大等特点, 因此通常不会对所有的数据进行永久化存储, 而且数据环境处在不断的变化之中, 系统很难准确掌握整个数据的全貌。

由于响应时间的要求, 流处理的过程基本在内存中完成, 其处理方式更多地依赖于在内存中设计巧妙的概要数据结构 (synopsis data structure), 内存容量是限制流处理模型

的一个主要瓶颈。以 PCM（相变存储器）为代表的储存级内存（storage class memory, SCM）设备的出现或许可以使内存未来不再成为流处理模型的制约。

## 2) 批处理

Google 公司在 2004 年提出的 MapReduce 编程模型是最具代表性的批处理模式。一个完整的 MapReduce 执行流程图如图 5-58 所示。

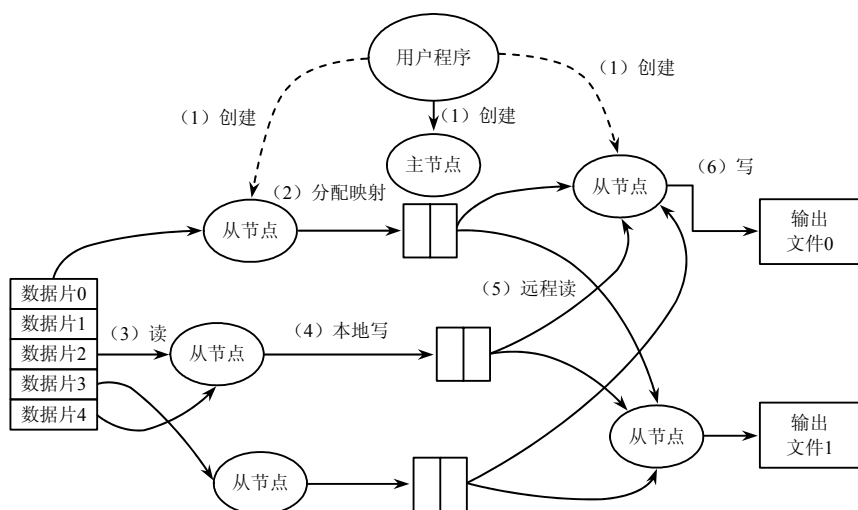


图 5-58 MapReduce 执行流程图

MapReduce 模型首先将用户的原始数据源进行分块，然后分别交给不同的 Map 任务区处理。Map 任务从输入中解析出键/值（Key/Value）对集合，然后对这些集合执行用户自行定义的 Map 函数，得到中间结果，并将该结果写入本地硬盘。Reduce 任务从硬盘上读取数据之后会根据 Key 值进行排序，将具有相同 Key 值的数据组织在一起。最后，用户自定义的 Reduce 函数会作用于这些排好序的结果，并输出最终结果。

从 MapReduce 的处理过程可以看出，MapReduce 的核心设计思想在于：① 将问题分而治之；② 把计算推到数据而不是把数据推到计算，从而有效避免了数据传输过程中产生的大量通信开销。

MapReduce 模型简单，且现实中很多问题都可用 MapReduce 模型来表示。因此该模型公开后立刻受到极大的关注，并在生物信息学、文本挖掘等领域得到广泛的应用。无论是流处理还是批处理都是大数据处理的可行思路。大数据的应用类型很多，在实际的大数据处理中，常常并不是简单地只使用其中的某一种，而是将两者结合起来。互联网是大数据最重要的来源之一，很多互联网公司根据处理时间的要求将自己的业务划分为在线（online）、近线（nearline）和离线（offline）三种，这种划分方式是按处理所耗时间来划分的。其中在线的处理时间一般在秒级甚至是毫秒级，因此通常采用上面所说的流处理。离线的处理时间可以以天为基本单位，基本采用批处理方式，这种方式可以最

大限度地利用系统的 I/O。近线的处理时间一般在分钟级或者是小时级,对其处理模型并没有特别的要求,可以根据需求灵活选择,但在实际中多采用批处理模式。

## 2. 大数据处理的基本流程

大数据的数据来源广泛,应用需求和数据类型都不尽相同,但是最基本的处理流程一致。海量 Web 数据的处理是一类非常典型的大数据应用,从中可以归纳出大数据处理的最基本流程,如图 5-59 所示。

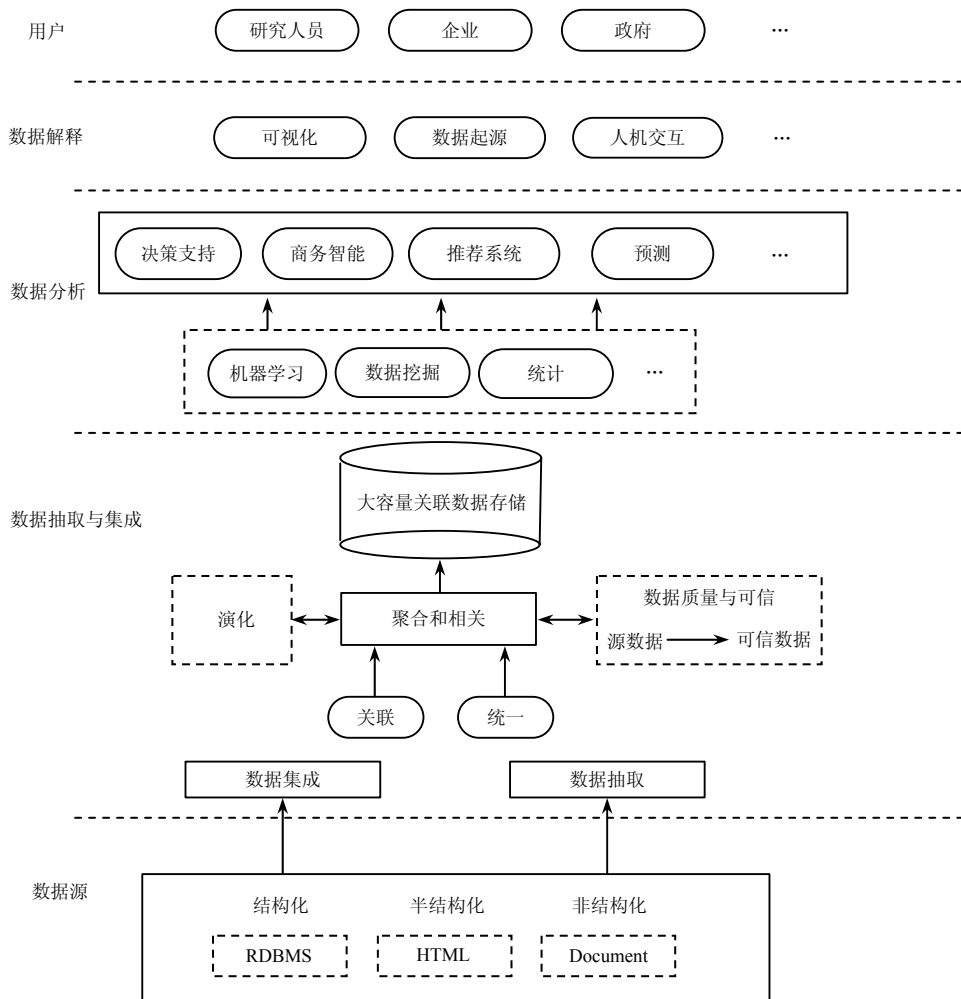


图 5-59 大数据处理基本流程

整个大数据的处理流程可以定义为在合适工具的辅助下,对广泛异构的数据源进行抽取和集成,结果按照一定的标准统一存储。利用合适的数据分析技术对存储的数据进行分析,从中提取有益的知识并利用恰当的方式将结果展现给终端用户。具体来说可以分为数据抽取与集成、数据分析及数据解释三类。



### 1) 数据抽取与集成

大数据的一个重要特点就是多样性,这就意味着数据来源极其广泛,数据类型极为繁杂,这种复杂的数据环境给大数据的处理带来极大的挑战。要想处理大数据,首先必须对所需数据源的数据进行抽取和集成,从中提取出关系和实体,经过关联和聚合之后采用统一定义的结构来存储这些数据。在数据集成和提取时需要对数据进行清洗,保证数据质量及可信性。同时还要特别注意前面提及的大数据时代模式与数据的关系,大数据时代的数据往往是先有数据再有模式,且模式是在不断的动态演化之中的。

数据抽取和集成技术不是一项全新的技术,传统数据库领域已对此问题有了比较成熟的研究。随着新的数据源的涌现,数据集成方法也在不断的发展之中。从数据集成模型来看,现有的数据抽取与集成方式可以大致分为基于物化或E T L方法的引擎(materialization or ETL engine)、基于联邦数据库或中间件方法的引擎(federation engine or mediator)、基于数据流方法的引擎(stream engine)及基于搜索引擎的方法(search engine)四种类型。

### 2) 数据分析

数据分析是整个大数据处理流程的核心,因为大数据的价值产生于分析过程。从异构数据源抽取和集成的数据构成了数据分析的原始数据。根据不同应用的需求可以从这些数据中选择全部或部分进行分析。传统的分析技术如数据挖掘、机器学习和统计分析等在大数据时代需要作出调整,因为这些技术在大数据时代面临着如下一些新的挑战。

(1) 数据量大并不一定意味着数据价值的增加,相反这往往意味着数据噪声的增多。因此在数据分析之前必须进行数据清洗等预处理工作,但是预处理如此大量的数据对于机器硬件以及算法都是严峻的考验。

(2) 大数据时代的算法需要进行调整。首先,大数据的应用常常具有实时性的特点,算法的准确率不再是大数据应用的最主要指标。很多场景中算法需要在处理的实时性和准确率之间取得一个平衡,比如在线的机器学习算法(online machine learning)。其次,云计算是进行大数据处理的有力工具,这就要求很多算法必须作出调整以适应云计算的框架,算法需要变得具有可扩展性。最后,在选择算法处理大数据时必须谨慎,当数据量增长到一定规模以后,可以从小量数据中挖掘出有效信息的算法并一定适用于大数据。统计学中的邦弗朗尼原理就是一个典型的例子。

(3) 对于数据结果好坏的衡量。得到分析结果并不难,但是对其结果的衡量却是大数据时代数据分析的新挑战。大数据时代的数据量大、类型庞杂,进行分析时往往对整个数据的分布特点掌握的不太清楚,这会导致最后在设计衡量的方法及指标时遇到诸多困难。

目前,大数据分析已被广泛应用于诸多领域,典型的有推荐系统、商业智能和决策支持系统等。

### 3) 数据解释

数据分析是大数据处理的核心,但是用户往往更关心结果的展示。如果分析的结果正确但是没有采用适当的解释方法,则所得到的结果很可能让用户难以理解,极端情况下甚至会误导用户。数据解释的方法很多,比较传统的就是以文本形式输出结果或者直接在计算机终端上显示结果。这种方法在面对小数据量时是一种很好的选择。但是大数据时代的数据分析结果往往也是海量的,同时结果之间的关联关系极其复杂,采用传统的解释方法基本不可行。

可以考虑从下面两个方面提升数据解释能力:

(1) 引入可视化技术。可视化作为解释大量数据最有效的手段之一率先被科学与工程计算领域采用。通过对分析结果的可视化,用形象的方式向用户展示结果,而且图形化的方式比文字更易被理解和接受。常见的可视化技术有标签云(tag cloud)、历史流(history flow)和空间信息流(spatial information flow)等。可以根据具体的应用需要选择合适的可视化技术。

(2) 让用户能够在一定程度上了解和参与具体的分析过程。这个既可以采用人-机交互技术,利用交互式的数据分析过程来引导用户逐步地进行分析,使得用户在得到结果的同时更好地理解分析结果的由来;也可以采用数据起源技术,通过该技术帮助追溯整个数据分析的过程,有助于用户理解结果。

## 5.4.3 大数据关键技术

大数据处理系统不管结构如何复杂,采用的技术千差万别,但在总体上总可以作一些基本分类。大数据系统结构如图 5-60 所示。

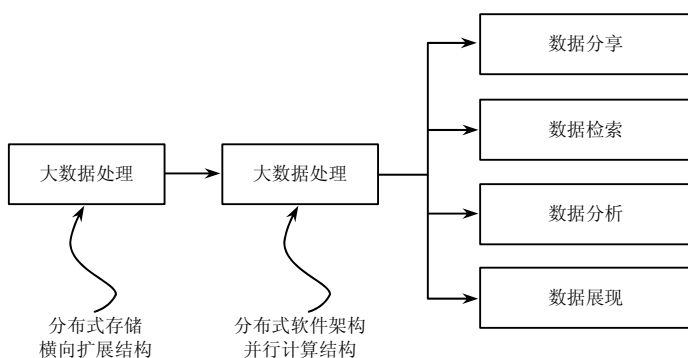


图 5-60 大数据系统结构

从数据处理的一般流程可以看到,在大数据环境下需要的关键技术主要针对海量数据的存储和海量数据的运算。传统的关系数据库经过近 40 年的发展已经成为了一门成熟同时仍在不断演进的数据管理和分析技术,结构化查询语言(SQL)作为存取关系数据

库的语言得到了标准化,其功能和表达能力也得到的不断增强。但是,关系数据管理系统的扩展性在互联网环境下遇到了前所未有的障碍,关系数据管理模型追求的是高度的一致性和正确性,纵向扩展系统,通过增加或者更换 CPU、内存、硬盘以扩展单个节点的能力,终会遇到“瓶颈”。因此不能胜任大数据分析的要求。

大数据的研究主要来源于依靠数据获取商业利益的大公司。Google 公司作为全球最大的信息检索公司,其走在了大数据研究的前沿。面对呈现爆炸式增加的 Internet 信息,仅仅依靠提高服务器性能已经远远不能满足业务的需求。如果将各种大数据应用比做“汽车”,支撑起这些“汽车”运行的“高速公路”就是云计算技术。

正是云计算技术在数据存储、管理与分析等方面的支持,才使得大数据有用武之地。Google 公司从横向进行扩展,通过采用廉价的计算机节点集群,改写软件,使之能够在集群上并行执行,解决海量数据的存储和检索功能。2006 年,Google 首先提出云计算的概念。支撑 Google 公司各种大数据应用的关键正是其自行研发的一系列云计算技术和工具。Google 公司大数据处理的三大关键技术为 Google 文件系统 GFS、MapReduce 和 Bigtable。Google 的技术方案为其他的公司提供了一个很好的参考方案,各大公司纷纷提出了自己的大数据处理平台,采用的技术也都大同小异。下面将从支持大数据系统所需要的分布式文件系统、分布式数据处理技术、分布式数据库系统和大数据系统从开源实现平台 Hadoop 方面介绍大数据系统的关键技术。

### 1. 分布式文件系统

文件系统是支持大数据应用的基础。Google 是有史以来唯一需要处理如此海量数据的大公司。对于 Google 而言,现有的方案已经难以满足其如此大的数据量的存储,为此 Google 提出了一种分布式的文件管理系统——GFS。

GFS 与传统的分布式文件系统有很多相同的目标,比如性能、可伸缩性、可靠性以及可用性。但是,GFS 的成功之处在于其与传统文件系统的不同。GFS 的设计思路主要基于以下的假设:对于系统而言,组件失败是一种常态而不是异常。GFS 是构建于大量廉价的服务器之上的可扩展的分布式文件系统,采用主从结构。通过数据分块、追加更新等方式实现了海量数据的高效存储,图 5-61 给出了 GFS 体系结构。但是随着业务量的进一步变化,GFS 逐渐无法适应需求。Google 公司对 GFS 进行了设计,实现了 Colossus 系统,该系统能够很好地解决 GFS 单点故障和海量小文件存储的问题。

除了 Google 公司的 GFS,众多的企业和学者也从不同的方面对满足大数据存储需求的文件系统进行了详细的研究。微软开发的 Cosmos 支撑其搜索和广告业务。HDFS、FastDFS、OpenAFS 和 CloudStore 都类似 GFS 的开源实现。类 GFS 的分布式文件系统主要针对大文件而设计,但是在图片存储等应用场景中,文件系统主要存储海量小文件,Facebook 为此推出了专门针对海量小文件的文件系统 Haystack,通过多个逻辑文件共享

同一个物理文件，增加缓存层和部分元数据并加载到内存等方式有效地解决了海量小文件的存储问题。Lustre 是一种大规模、安全可靠的，具备高可靠性的集群文件系统，它由 SUN 公司开发和维护。该项目主要的目的就是开发下一代的集群文件系统，可以支持超过 10 000 个的节点、数亿拍字节的数据存储系统。

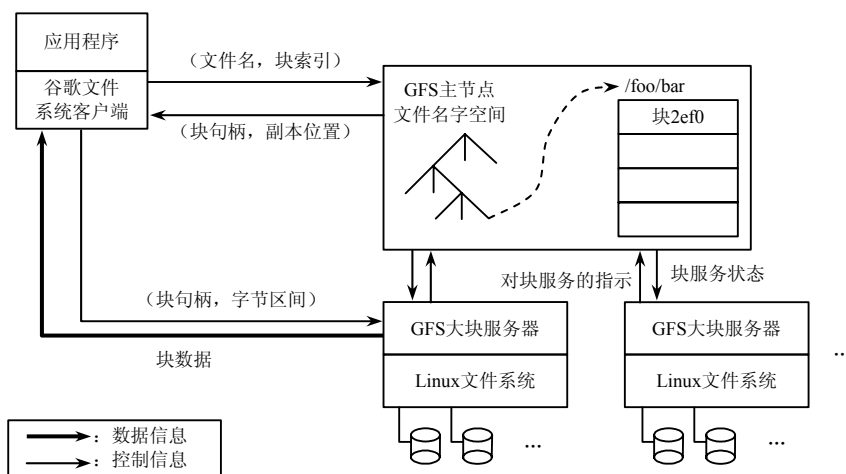


图 5-61 GFS 体系结构

## 2. 分布式数据处理系统

首先回顾一下本书讲到的大数据处理模式。大数据的处理模式分为流处理和批处理两种。流处理是直接处理，批处理则采用先存储再处理的过程。流处理将数据视为流，源源不断的数据形成数据流。当新的数据到来，即立即处理并返回所需的结果。大数据的实时处理是一个极具挑战性的工作，数据具有大规模、持续到达的特点。因此，如果要求实时处理大数据，必然要求采用分布式的方式，在这种情况下，除了应该考虑分布式系统的一致性，还将涉及分布式系统网络时延的影响，这都增加了大数据流处理的复杂性。

Google 公司提出的 MapReduce 编程模型是最具代表性的分布式数据处理系统。MapReduce 架构的程序能够在大量的普通配置的计算机上实现并行化处理。这个系统在运行时只关心如何分割输入数据，在大量计算机组成的集群上的调度，集群中计算机的错误处理，管理集群中的计算机之间必要的通信。对于有些计算，由于输入数据量的巨大，想要在可接受的时间内完成运算，只有将这些计算分布在成百上千的主机上。这种计算模式对于如何处理并行计算、如何分发数据和如何处理错误信息需要大规模的代码处理，使得原本简单的运算变得难以处理。MapReduce 就是针对上述问题的一种新的设计模型。

MapReduce 模型的主要贡献就是通过简单的接口来实现自动的并行化和大规模的分

布式计算，通过使用 MapReduce 模型接口实现在大量普通的 PC 上的高性能计算。

MapReduce 编程模型的原理是利用一个输入键/值 (Key/Value) 对集合产生一个输出的 key/value 对集合。MapReduce 库的用户用 Map 和 Reduce 两个函数表达这个计算。用户自定义的 Map 函数接收一个输入的 key/value 值，然后产生一个中间 key/value 对集合。MapReduce 库把所有具有相同中间 key 值的 value 值集合在一起传递给 Reduce 函数。用户自定义的 Reduce 函数接收一个中间 key 的值和相关的一个 value 值的集合。

Reduce 函数合并这些 value 值，形成一个较小的 value 值集合，MapReduce 执行流程如图 5-58 所示。

MapReduce 的提出曾经遭到过一系列的指责和诟病。数据专家 Stonebraker 就认为 MapReduce 是一个巨大的倒退，指出其存取没有优化、依靠蛮力进行数据处理等问题。但是随着 MapReduce 在应用上的不断成功，以其为代表的大数据处理技术还是得到了广泛的关注。研究人员也针对 MapReduce 进行了深入的研究，目前针对 MapReduce 的性能继续提升研究主要包括多核硬件与 GPU 上的性能提高，索引技术与连接技术的优化及调度技术优化等。在 MapReduce 的易用性的研究上，研究人员正在研究更为高层的、表达能力更强的语言和系统，包括 Yahoo 的 Pig、Microsoft 的 LINQ 和 Hive 等。

除了 Google 公司的 MapReduce，还有部分学者设计实现了 Sectorand Sphere 云计算平台，包括 Sector 和 Sphere 两部分。Sector 是部署在广域网的分布式系统，Sphere 是建立在 Sector 上的计算服务。Sphere 是以 Sector 为基础构建的计算云，它提供大规模数据的分布式处理。Sphere 的基本数据处理模型如图 5-62 所示。

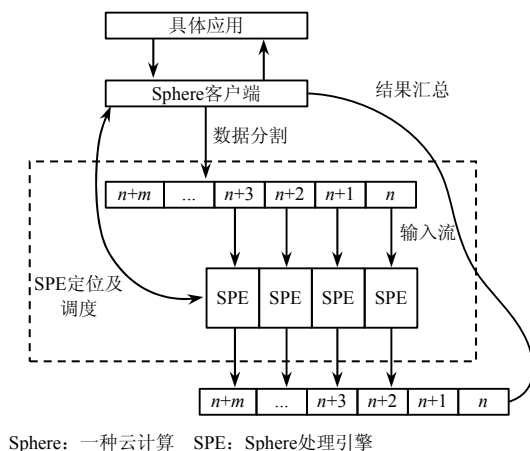


图 5-62 Sphere 的基本数据处理模型

针对不同的应用会有不同的数据，Sphere 统一地将它们以数据流的形式输入。为了便于大规模地并行计算，首先需要对数据进行分割，分割后的数据交给 SPE 执行。SPE 是 Sphere 处理引擎，是 Sphere 的基本运算单元。除了进行数据处理外，SPE 还能起到负

载平衡的作用,因为一般情况下数据量远大于 SPE 数量,当前负载较重的 SPE 能继续处理的数据就较少,反之则较多,如此就实现了系统的负载平衡。

### 3. 分布式数据库系统

传统的关系模型分布式数据库难以适应大数据时代的要求,主要原因如下所述。

(1) 规模效应带来的压力。大数据时代的数据远远超出单机处理能力,分布式技术是必然的选择。传统的数据库倾向于采用纵向扩展的方式,这种方式下性能的增加远低于数据的增加速度。大数据采用数据库系统应该是横向发展的,这种方式具有更好的扩展性。

(2) 数据类型的多样性和低价值密度性。传统的数据库适合结构清晰,有明确应用目的的数据,数据的价值密度相对较高。在大数据时代数据的存在形式是多样的,各种半结构化、非结构化的数据是大数据的重要组成部分。如何利用如此多样、海量的低价值密度的数据是大数据时代数据库面临的重要挑战之一。

(3) 设计理念的冲突。关系数据库追求的是“一种尺寸适用所有”,但在大数据时代,不同的应用领域在数据类型、数据处理方式及数据处理时间的要求上千差万别。实际处理中,不可能存在一种统一的数据存储方式适应所有的场合。面对这些挑战,Google 公司提出了 Bigtable 的解决方案。Bigtable 的设计目的是可靠的处理拍字节级别的数据,并且能够部署到千台机器上。现在 Bigtable 已经实现了适用性广泛、可扩展、高性能和高可靠性的目标,且已经在超过 60 个 Google 的产品和项目上得到了应用。

这些产品在性能要求和集群的配置上都提出了迥异的需求,Bigtable 都能够很好地满足。Bigtable 不支持完整的数据库模型,它为用户提供了简单的数据模型,利用这个模型,客户可以动态控制数据的分布和格式。用户也可以自己推测底层存储数据的位置相关性。数据的下标是行和列的名字,名字可以是任意的字符串。Bigtable 将存储的数据都视为字符串,但是 Bigtable 本身不去解释这些字符串,客户程序通常会把各种结构化或者半结构化的数据进行转换变为字符串。通过仔细选择数据的模式,客户可以控制数据位置的相关性。最后,可以通过 Bigtable 的模式参数来控制数据是存放在内存中、还是硬盘上。Bigtable 数据模型如图 5-63 所示,它给出了 Bigtable 存储大量网页信息的一个示例。

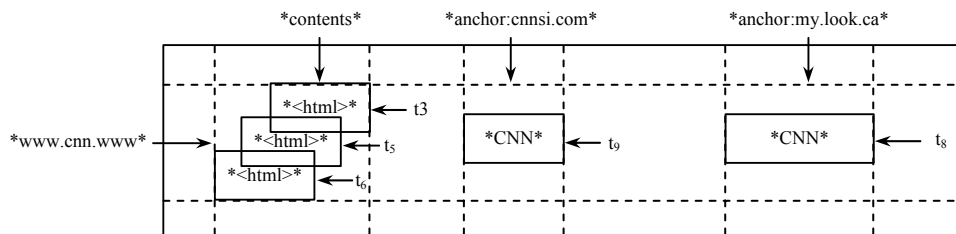


图 5-63 Bigtable 数据模型示例

除了 Google 公司为人熟知的 Bigtable, 其他的大型 Internet 内容提供商也纷纷提出大数据系统。具有代表性的系统有 Amazon 公司的 Dynamo 和 Yahoo 公司的 PNUTS。Dynamo 综合使用了键/值存储和改进的分布式哈希表 (DHT) 及向量时钟等技术实现了一个完全的分布式、去中性化的高可用系统。PNUTS 是一个分布式的数据库系统, 在设计上使用弱一致性来达到高可用性的目标, 主要的服务对象是相对较小的记录, 比如在线的大量单个记录或者小范围记录集合的读和写的访问, 但它不适合存储大文件和流媒体。

Bigtable、Dynamo 和 PNUTS 等技术的成功促使研究人员开始对关系数据库进行反思, 并产生了一批采用关系模型的数据库, 这些方案通称为 NoSQL(not only SQL)。NoSQL 数据库具有支持简易备份、简单的应用程序接口、一致性和支持海量数据的特征。目前典型的非关系型数据库主要有以下几种类别, 如表 5-2 所示。

表 5-2 典型非关系型数据库

类别	相关数据	库性能	扩展性	灵活性	复杂性	优点	缺点
Key-Value	Redis Riak	高	高	高	无	查询高效	数据存储缺乏结构
Column	HBase Cassandra	高	高	中	低	查询高效	功能有限
Document	Couch DB Mongo DB	高	可变	高	低	对数据结构限制小	查询性能低
Graph	Orient DB	可变	可变	高	高	图算法高效	数据规模小

#### 4. 大数据系统的开源实现平台 Hadoop

除了商业化的大数据处理方案, 还有一些开源的项目也在积极地加入到大数据的研究当中。Hadoop 是一个开源分布式计算平台, 它是 MapReduce 计算机模型的载体。借助于 Hadoop, 软件开发者可以轻松地编出分布式并程序, 从而在计算机集群上完成海量数据的计算。Intel 公司给出了一种 Hadoop 的开源实现方案, 如图 5-64 所示。

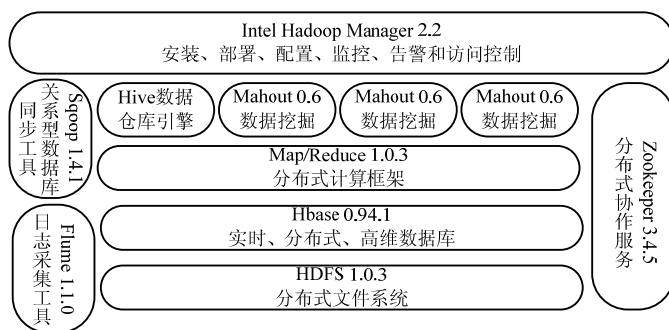


图 5-64 Intel 公司的 Hadoop 发行版 IDH 组件

在该系统中, HDFS 是与 GFS 类似的分布式文件系统, 它可以构建从几台到几千台常规服务器组成的集群, 并提供高聚合输入/输出的文件读/写访问。Hbase 是与 Bigtable 类似的分布式、按列存储的、多维表结构的实时分布式高维数据库, 可以提供对大数据量结构化和非结构化数据的高速读/写操作。Hive 是基于 Hadoop 的大数据分布式数据仓库。

库引擎，它可以将数据存放在分布式文件系统或分布式数据库中，并使用 SQL 语言进行海量信息的统计、查询和分析操作。

ZooKeeper 是针对大型分布式系统的分布式协作服务可靠协调系统，其提供的功能包括配置维护、名字服务、分布式同步和组服务等。它可以维护系统配置、群组用户和命名等信息。Sqoop 提供高效的在 Hadoop 与结构化数据源之间双向传送数据的连接器组件。它将数据传输任务转换为分布式 Map 任务实现，在传输过程中还可以实现数据转换等功能。Flume 是分布式、高可靠的和高可用的日志采集系统，它用来从不同源的系统中采集、汇总和搬移大量日志数据到一个集中式的数据存储器中。





## 第6章

# 无线传感器网络管理技术

由于无线传感器网络资源有限——其能量、存储能力、计算能力都低于传统无线网络，而且一般情况下还具有大规模、高密度等特点，因此无线传感器网络需要多种管理技术来支撑其各种应用需求。同时，无线传感器网络军事应用较民用要求更高，如军用无线传感器网络中传感器节点通常采用飞机或炮弹抛撒的方式进行随机部署，因此需要高效的自组织技术实现目标区域的覆盖和传感器节点间的连通；丰富的战场感知数据只有与精确的位置信息和时间信息相结合，才能为军事决策、精确打击等行动提供支撑；军事应用特性要求无线传感器网络具有寿命优先（能耗最低）、性能优先（能耗最高）等不同的管理和控制策略。可见，拓扑控制技术、时间同步技术、节点定位技术及管理和控制技术是无线传感器网络军事应用比较核心和亟需解决的管理技术，本章将结合军事应用要求，重点介绍这四项技术。



## 6.1 拓扑控制技术

拓扑控制是无线传感器网络的关键技术之一，其主要解决的问题是在保证网络的覆盖度和连通性的前提下，有效、合理地设置或调整节点的发射功率，并根据一定的原则选择合适的传感器节点成为骨干节点参与网络数据的处理和传输，达到优化网络拓扑结构的目的。与传统无线自组织网络相比，无线传感器网络具有大规模、随机部署、面临环境复杂、节点能量有限、链路易失效等特点，使得无线传感器网络需要一种更加优化和高效的拓扑控制技术，以降低传感器节点的能量消耗，减少 MAC 层的数据冲突和降低网络路由的复杂度，同时提高网络的容错性、可靠性和可扩展性。

### 6.1.1 拓扑控制特点及分类

在传统的无线自组织网络中，拓扑控制是指通过一定的控制机制，自适应地将一组节点组织成一个连通的网络，通过优化路由和资源管理策略最大化带宽利用率，同时为用户提供一定的服务质量保障。但是对于无线传感器网络而言，由于其自身的特殊性，导致其拓扑控制的目标主要是保障节点间可达性，降低节点能量的消耗，提升网络容量，减少信道干扰，以及增强网络容错性和可靠性等多个方面。对于无线传感器网络某些特定应用，拓扑控制的目标还涉及支持弱移动性，降低传输延迟和优化通信链路质量等方面。

为了实现上述目标，无线传感器网络拓扑控制需要重点考虑如下四项原则。

(1) 功率控制与睡眠调度相统一原则。要创建能量高效的网络拓扑，必须综合考虑网络的通信能耗和空闲能耗，即将功率控制与睡眠调度统一起来，通过功率控制有效降低无线传感器网络的通信能耗，通过睡眠调度机制来间歇性关闭部分传感器节点的通信模块，降低节点的空闲能耗，从而实现网络能量的最优化。

(2) 网络连通性与目标有效覆盖相结合原则。在大规模无线传感器网络中，感知数据是通过多跳方式传输的，因此网络连通性必须保证。特别对于无线传感器网络的军事应用，网络的连通性直接涉及网络的可靠性，而网络连通性的提高一般意味着网络能量消耗的增加。同时传感器感知的范围通常小于传感器节点的通信范围，因此在考虑网络连通性时，必须考虑是否能够有效覆盖目标。

(3) 能量感知与通信代价相结合原则。对节点负载和剩余能量的感知是实现能量高效拓扑控制的基础，通过动态感知与预测网络中传感器节点所承担的通信代价和剩余能量，可以有效支撑分布式动态高效拓扑控制技术的实现。

(4) 路由机制相结合原则。从拓扑控制的研究情况来看，拓扑控制在协议栈中的位置可以是 MAC 层和网络层，也可以在 MAC 层上与网络层之下。通常，由于拓扑控制需要保证网络的连通性，下层协议很难高效实现，因此能量高效的拓扑控制需要与路由机

制相结合。

根据上述原则,研究者提出了多种拓扑控制算法,对这些方法进行分类,可以按照拓扑控制的管理方式划分、按照拓扑的形成依据划分和按照拓扑的实现需求划分三个角度。

### 1. 按照拓扑的管理方式划分

根据拓扑控制的管理方式,可以将拓扑控制分为功率型拓扑控制、层次型拓扑控制、启发式拓扑控制和混合型拓扑控制。其中功率型拓扑控制是指通过设置或动态调整传感器节点的发送功率,在保证网络的连通性和覆盖度的前提下,尽可能降低节点的能量消耗,以及避免隐终端和暴露终端问题。层次型拓扑控制主要通过分簇机制来控制网络拓扑结构、簇头节点形成处理和转发数据的骨干网络,以降低数据传输过程中的能量消耗。启发式拓扑控制是面向应用事件驱动的拓扑控制方法,骨干网节点在没有检测到事件时不必一直保持活动状态,而是在有事件发生时才自动醒来,并唤醒邻居节点,从而尽可能地降低网络能耗。混合型拓扑控制则是上述任意两种方式的混合应用。

### 2. 按照拓扑的形成依据划分

拓扑控制方法通常分为基于几何方式的拓扑控制和基于概率方式的拓扑控制。其中,基于几何方式的拓扑控制是以某种特定结构,如最小生成树(Minimum Spanning Tree, MST)、RNG图(Relative Neighborhood Graph)和GG图(Gabriel Graph)等来实现网络拓扑控制;基于概率方式的拓扑控制主要通过几何随机图、占位理论等计算和优化网络的节点功率和度值,以对网络进行拓扑控制。

### 3. 按照拓扑的实现需求划分

从无线传感器网络拓扑控制算法的实现需求看,可分为基于精确地理位置的拓扑控制、基于方位信息的拓扑控制和基于邻居集信息的拓扑控制。

不过总体来看,随着拓扑控制研究的不断发展,多种分属不同类别的策略被组合用于拓扑控制研究,因此拓扑控制的分类越加趋于模糊,同一拓扑控制方法可能分属不同类别。不过相对来说,拓扑控制较为主流的分类方法是按照拓扑的管理方式来划分,因此本书从功率型拓扑控制、层次型拓扑控制、启发式拓扑控制和混合型拓扑控制四种类型入手,介绍目前比较有代表性的拓扑控制方法,如图6-1所示。

## 6.1.2 功率型拓扑控制

功率型拓扑控制是指通过合理地设置或动态调整传感器节点的发射功率,在保证整个网络的连通性和覆盖性的基础上,尽可能地降低传感器节点间的相互干扰,达到提高节点能量利用率和延长网络生命周期的目的。基于上述思路,通常采用的方法是:每个传感器节点只与它最近的 $k$ 个邻居节点通信,而数字 $k$ ,可以根据不同的目标进行优化。

目前常用的优化目标是网络的连通性以及网络吞吐量。对于无线传感器网络而言,连通性是其拓扑控制必须要考虑的关键问题,因此优化目标通常是网络拓扑的连通性。根据目前功率型拓扑控制算法研究情况可知,当传感器节点部署在二维或三维空间时,无线传感器网络的拓扑控制是一个非确定多项式难度的问题。因此,一般的解决方案都是通过寻找近似方法来解决。

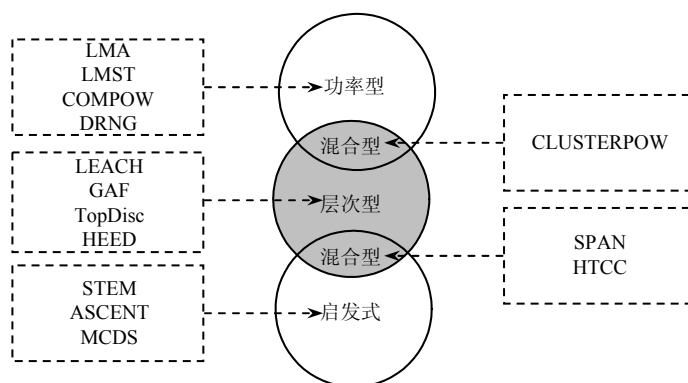


图 6-1 拓扑控制算法与分类

目前,典型的功率型拓扑控制方法包括本地平均算法(Local Mean Algorithm, LMA)、基于本地最小生成树结构(Local Minimum Spanning Tree, LMST)的拓扑控制算法、COMPOW(Common Power)拓扑控制算法、DRNG(Directed Relative Neighborhood Graph)拓扑控制算法、DLSS(Directed Local Spanning Subgraph)算法和 CONREAP 算法等,本节将重点介绍 LMA、COMPOW 拓扑控制算法和 DRNG 拓扑控制算法三种比较典型的拓扑控制方法。

### 1. LMA

LMA 是 Kubisch 等提出的一种基于节点度的拓扑控制算法,其中节点的度数是指所有距离该节点一跳距离的邻居节点数目。基于节点度的拓扑控制算法的基本思想是通过给定节点度的上限和下限需求,动态调整节点的发射功率,使得节点的度数落在上限与下限之间,利用网络局部信息来调整相邻节点间的连通性,从而保证整个网络的连通性,同时保证节点间的链路具有一定的冗余性和可扩展性。

具体来讲,LMA 首先给定节点度值的上下限,通过动态调整传输功率使得节点度坐落于该区间,同时节点度的上、下限选取需保证拓扑连通具有一定程度的可扩展性和冗余性。LMA 的具体实现通常可分为以下三步骤:

(1) 在起始状态,赋予所有传感器节点相同的初始传输功率 TransPower,传感器节点定期广播一个包含自身唯一标识 ID 的报文 LifeMsg 消息。

(2) 对于接收到 LifeMsg 消息的传感器节点,发送一个 LifeAckMsg 应答消息。由于

该应答消息中也包含了传感器节点的 ID, 因此传感器节点可由反馈回的应答消息 LifeAckMsg 来统计出其周围的邻居节点数 NodeResp。

(3) 如果 NodeResp 小于预设的邻居节点数的下限 NodeMinThresh, 那么传感器节点在这轮发送中将增大发射功率, 如式 (6.1) 所示; 但是, 如果 NodeResp 大于邻居节点数上限 NodeMaxThresh, 那么传感器节点将减少发射功率, 如式 (6.2) 所示, 即

$$\text{TransPower} = \min \{ B_{\max} \times \text{TransPower}, A_{\text{inc}} \times (\text{NodeMinThresh} - \text{NodeResp}) \times \text{TransPower} \} \quad (6.1)$$

$$\text{TransPower} = \max \{ B_{\min} \times \text{TransPower}, A_{\text{dec}} \times (1 - (\text{NodeResp} - \text{NodeMaxThresh})) \times \text{TransPower} \} \quad (6.2)$$

式中,  $B_{\max}$ 、 $B_{\min}$ 、 $A_{\text{inc}}$  和  $A_{\text{dec}}$  为四个可调的预设参数, 从表达式中可知它们直接关系到功率调整的幅度。

LMA 的优势在于简单和易部署, 仅需依靠局部信息判断邻居数即可确定节点的功率, 因此对传感器节点的要求不高, 也不需要严格的时间同步。但该算法缺少严格的理论推导, 目前主要通过计算机仿真来验证该算法可以有效保证算法的收敛性和网络的连通性; 其次节点度值上、下限及预设系数会对该算法性能产生至关重要的影响, 其选取应综合考虑节点分布、部署环境及应用背景等因素; 最后, 节点度值区间的单一考虑必将带来一个不可忽略的负面制约, 即无法较好地权衡影响网络生命周期的多种拓扑特性。

## 2. COMPOW 拓扑控制算法

COMPOW 拓扑控制算法是伊利诺斯大学的 Narayanaswamy 等人提出的、一种典型的统一功率分配算法, 该算法假设所有传感器节点是同构的, 统一调整传感器节点的传输功率, 找到确保整体网络连通的最小功率。该算法假设的功率统一性主要基于链路的双向连通性考虑的, 而功率的最小化主要是为了降低传感器节点间的传输能耗, 同时通过降低信道间的干扰, 来提高整个无线传感器网络的吞吐能力。可见, COMPOW 的主要优点包括延长网络生命周期、拓展网络容量和降低 MAC 层的冲突等。

COMPOW 拓扑控制算法中统一功率的确定可以分为三步进行:

(1) 传感器节点维护对应于不同功率等级的多个路由表, 全体节点同时以某一功率等级发射并形成拓扑;

(2) 在生产的网络拓扑上执行 DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector) 路由协议, 从而获得一个能够反映与网内节点连通情况的路由表;

(3) 在保证全局连通的情况下, 将传感器节点的最低发射功率作为统一功率。

COMPOW 拓扑控制算法证明了此时所有节点的最低功率等级是一致的, 符合功率的统一性, 可见 COMPOW 拓扑控制算法的实质是将功率控制与路由协议相结合的节能解决方案。但是, 功率的统一性和最小化带来益处的同时也导致 COMPOW 拓扑控制算法

存在无法避免的缺陷：首先，功率的统一性约束了 COMPOW 拓扑控制算法的适用范围，当传感器节点分布不均时，必将迫使所有节点采用过大的发射功率，这将极大地违背无线传感器网络拓扑控制算法的设计目标；其次，COMPOW 拓扑控制算法通过功率最小化降低全局连通性，有效降低了网络的能量消耗，但是对于军事应用而言，对无线传感器网络的容错性、鲁棒性和可靠性要求比较高，显然 COMPOW 拓扑控制算法构造的网络拓扑将不具备较好的容错能力；最后，COMPOW 拓扑控制算法需要全局网络拓扑信息来实现网络的拓扑优化，因此随着传感器节点的增多，COMPOW 拓扑控制算法的负载开销和节点能耗将会显著增加。

### 3. DRNG 拓扑控制算法

DRNG 拓扑控制算法是 Li Ning 提出的一种基于邻近图的功率型拓扑控制算法，其基本思想是首先使所有传感器节点处于最大发射功率，将此时形成的网络拓扑定义为图  $G$ ——由网络中节点和节点间的边组成；然后按照一定的相邻判别条件求取该图的邻近图；最后邻近图中的每个传感器节点根据与自己相距最远的相邻节点之间的距离来确定其发射功率。一般认为，无线传感器网络两节点间的通信是对称的，即双向连通，因此为了避免出现单向边的情况，需要对获得的邻近图进行必要的边增加或删减，以确保最终获得的网络拓扑图上的边都是双向的。

DRNG 拓扑控制算法主要基于经典的邻近图理论，用于“解决传感器节点发射功率不一致情况下无线传感器网络拓扑控制的问题”。

为了具体阐述 DRNG 拓扑控制算法的具体实现，首先对该算法用到的参数进行定义。

**【定义 1】** 节点  $u$  与  $v$  之间的连接通常是非对称的，因此定义  $u$  到  $v$  的边为  $(u, v)$ ，定义  $v$  到  $u$  的边为  $(v, u)$ ；

**【定义 2】**  $d(u, v)$  表示节点  $u$  与  $v$  之间的距离， $R_u$  表示节点  $u$  的通信半径， $N_u^R$  表示节点  $u$  的以最大通信半径通信时可达的节点集合，即可达邻居集，由节点  $u$  和  $N_u^R$  以及这些节点之间的边构成可达邻居子图  $G_u^R$ ；

**【定义 3】** 为每条边  $(u, v)$  赋予对应的权重  $w(u, v)$ ，并且权重函数满足如下关系

$$w(u_1, v_1) > w(u_2, v_2) \Leftrightarrow d(u_1, v_1) > d(u_2, v_2) \quad (6.3)$$

或

$$d(u_1, v_1) = d(u_2, v_2), \text{ 但 } \max\{ID(u_1), ID(v_1)\} > \max\{ID(u_2), ID(v_2)\}$$

或

$$d(u_1, v_1) = d(u_2, v_2), \text{ 且 } \max\{ID(u_1), ID(v_1)\} = \max\{ID(u_2), ID(v_2)\}$$

但

$$\min\{ID(u_1), ID(v_1)\} > \min\{ID(u_2), ID(v_2)\}$$

DRNG 拓扑控制算法具体实现步骤如下所述。

(1) 首先每个传感器节点以最大功率向其邻居节点广播发送包含自身标示 ID 和位置信息的“HELLO”消息,各节点在接收到“HELLO”消息后,确定自己的可达相邻集合  $N_u^R$ 。相邻节点的判断条件是:假设节点  $u$  与  $v$  之间的距离满足条件  $d(u,v) < R_u$ , 而且不存在另外一个节点  $k$  同时满足条件,即

$$\begin{aligned} w(u,k) &< w(u,v) \\ w(k,v) &< w(u,v) \\ d(k,v) &< R_k \end{aligned} \quad (6.4)$$

则节点  $u$  是节点  $v$  的相邻节点。

(2) 节点  $u$  在确定其相邻节点集之后,根据与自己相距最远的相邻节点之间的距离来调整发射功率,使得相距最远的相邻节点正好落在节点  $u$  的发送半径之内。

(3) 最后,为了保证网络的双向连通性,还需要对  $G_u^R$  的邻近图进行必要的边调整,即删除和增加节点间的边。

DRNG 拓扑控制算法在充分利用邻近图理论的基础上,重点考虑网络的连通性,针对无线传感器网络通信非对称实际特点,提出一种节点发射功率不一致的拓扑控制算法,尽量减少了网络拓扑中的边,有效降低了节点的发射功率,延长了网络生命周期,同时也减少了节点间的通信干扰。但是 DRNG 拓扑控制算法并没有充分考虑无线传感器网络拓扑的容错性和鲁棒性。

### 6.1.3 层次型拓扑控制

对于无线传感器网络而言,传感器节点的无线通信模块在空闲状态下的能量消耗与收/发状态下的能量消耗基本相当,因此关闭传感器节点的无线通信模块,将能大幅度降低传感器节点的能量消耗。同时,对于密集部署的无线传感器网络,并不需要每一个感知节点都一直处于活跃或空闲状态。因此,为了有效降低传感器节点的能量消耗和提高网络的利用效率,层次型拓扑控制机制被提出,该机制通过选择网络中的部分节点作为骨干网节点,组成一个连通网络,负责数据的转发任务,其他非骨干节点关闭其通信模块,进入休眠状态以降低传感器节点的能量消耗。可见,层次型拓扑控制通过动态地将网络中传感器节点划分为簇头节点和簇成员节点,让簇头节点负责簇成员节点工作的协调和数据的接收,并对所接收的数据进行融合处理后转发,以降低网络能量消耗;同时,簇成员节点可以在没有数据发送的情况下进行休眠,以进一步降低能量消耗。

目前,典型的层次型拓扑控制方法包括:LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 拓扑控制算法、GAF (Geographical Adaptive Fidelity) 拓扑控制算法、TopDisc (Topology Discovery) 拓扑控制算法、HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering)

拓扑控制算法和 GAF 改进拓扑控制算法等, 本节将重点介绍 TopDisc 拓扑控制算法、HEED 拓扑控制算法和 GAF 改进拓扑控制算法三种比较典型的拓扑控制方法。

### 1. TopDisc 拓扑控制算法

TopDisc 是一种基于最小支配集问题的经典算法, 其本质是一种先选簇头后划分区域的拓扑控制方法, 它主要利用颜色区分节点状态, 解决骨干网络拓扑结构形成问题。其基本思路是由网络中的一个节点启动发送用于发现邻居节点的查询消息, 查询消息自身携带发送节点的状态信息, 随着查询消息在网络中的不断传播, TopDisc 拓扑控制算法依次为每个节点标记颜色, 并按照节点自身的颜色来选择簇头节点, 通过反向寻找查询消息的传播路径在簇头之间建立通信链路。

按照颜色数区分, TopDisc 拓扑控制算法分为三色算法和四色算法两种具体的节点状态标记方法。其共同点是利用颜色标记理论找到簇头节点和利用与传输距离成反比的延时, 使得一个黑色节点(簇头)覆盖更大的区域。两个算法的不同点是寻找簇头的标准不一样。下面以四色算法为例, 阐述 TopDisc 拓扑控制算法具体实现步骤。

(1) 发起节点标记自身为黑色, 并广播一个拓扑发现请求报文;

(2) 白色节点收到黑色节点请求后标记自身为灰色, 灰色节点等待与黑、灰两点间距离成反比的时间后再广播请求报文;

(3) 白色节点收到灰色节点请求报文则标记自身为深灰色, 继续广播并开启定时器, 定时时间与灰、深灰两点间距离成反比, 若该节点在等待时间内收到黑色节点请求报文, 则标记自身为灰色, 反之标记为黑色;

(4) 当白色节点收到深灰色节点请求报文, 等待与深灰、白色两点间距离成反比的时间, 在等待时间内若收到黑色节点请求报文, 则标记自身为灰色, 反之标记为黑色, 随后继续广播请求;

(5) 灰色或黑色节点忽略其他节点请求;

(6) 形成骨干网, 黑色节点即为簇头, 灰色节点为普通节点。

在以上步骤中, 黑色指已确定的簇头, 深灰指距最近黑色节点两跳的未覆盖节点, 灰色指簇内普通节点, 白色指尚未搜索到的节点。图 6-2 所示为 TopDisc 拓扑控制算法执行实例, 其中节点 A 发起拓扑发现请求并标识自身为黑色, 并向外广播请求; 节点 B 收到节点 A 的请求后标记自身为灰色, 等待一段时间后继续发送请求; 节点 C、节点 E 收到节点 B 的请求变成深灰色, 随后继续发送请求, 并等待一段时间; D 接收到节点 C 的请求并在等待期内未收到黑色节点请求, 则标记自身为黑色; 节点 C 收到黑色节点请求后标记自身为灰色, 节点 E 在等待期内未收到黑点请求因而标记自身为黑色。

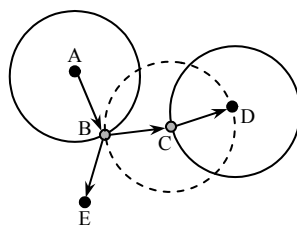


图 6-2 TopDisc 拓扑控制  
算法执行实例图



TopDisc 拓扑控制算法通过泛洪方式为每个节点标记颜色,随后根据颜色区分簇头和普通节点,可使节点在密集部署的无线传感器网络内快速成簇,并连接簇头形成树状的骨干网。但 TopDisc 拓扑控制算法重复执行的计算量和通信量过大,且未考虑节点的剩余能量问题,因而损害了分簇机制的合理性。

## 2. HEED 拓扑控制算法

HEED 拓扑控制算法是一种基于迭代思想的分布式分簇拓扑控制方法,其基本思想是:首先,根据传感器节点的剩余能量来概率性地选择一些候选节点;其次,定义簇内平均最小可达功率(Average Minimum Reachability Power, AMRP)指标来衡量簇内节点的通信成本;最后,根据候选节点的簇内平均最小可达功率的大小来竞争产生最终的簇头节点。

可见,HEED 拓扑控制算法簇头的选择主要依据主、次两个参数。主参数依赖于节点剩余能量,用于随机选取初始簇头集合。具有较多剩余能量的节点将有较大的概率成为候选簇头,而最终该节点是否一定成为簇头取决于剩余能量是否比周围节点多得多,以及分簇后簇内的通信成本。

HEED 拓扑控制算法的实现步骤如下所述。

(1) 初始阶段:首先,每个传感器节点计算在其一跳范围内的邻居节点个数;然后,计算自身的 AMRP 值并进行广播,如式(6.5)所示,同时计算自身成为候选簇头的初始概率  $Pr$ 。

$$AMRP(i) = \frac{\sum_{k=1}^M Minpwr_k}{M} \quad (6.5)$$

式中,  $AMRP(i)$  表示簇内所有  $M$  个节点到达簇头  $i$  所需要的平均最小功率,  $M$  为节点  $i$  的所有邻居节点数,  $Minpwr_k$  表示第  $k$  个节点能够与簇头通信的最小发射功率。由于假设每个传感器节点可以动态调整自身的发射功率,因此可以用 AMRP 评估一个簇的簇内通信代价,即

$$Pr = \max(C \frac{E_r}{E_m}, p_{\min}) \quad (6.6)$$

式中,  $C$  表示设定的簇头节点数占总节点数的比例,  $E_r$  表示估计的节点剩余能量,  $E_m$  为节点最大能量,  $p_{\min}$  表示设定的最小概率,以保证算法在常数迭代次数内完成。

(2) 迭代阶段:在算法的每次迭代中,如果节点发现在其邻居节点中已有候选簇头节点被选出,就选择通信代价最小的作为自身的候选簇头节点;如果邻居节点中没有候选簇头节点被选出,就将  $Pr$  乘以 2,并以新的  $Pr$  概率推荐自身为候选簇头,并广播成为候选簇头的消息。当  $Pr$  的值达到 1 时,算法做最后一次迭代,被选举的簇头节点在最后一次迭代中宣布自己成为簇头。

(3) 簇头确认：在迭代结束后，如果候选簇头节点邻居中没有其他候选簇头节点或它们的 AMRP 值大于自身，则该候选簇头宣布自身为最终的簇头。

HEED 拓扑控制算法综合考虑了节点的生存时间、可扩展性和负载均衡，对传感器节点的分布和能力没有特殊要求，同时该算法的簇头选择具有完全分布式的簇头产生方式、在有限次迭代内完成簇头的产生、控制报文的开销最小化和簇头分布均衡的特点。但是 HEED 拓扑控制算法忽略了簇头与汇聚节点之间的距离，从而导致某簇头距离汇聚节点较远而其最小平均功率较低；加入该簇的节点较多，导致该簇头处理的数据量较大，能耗开销较高两个问题。

### 3. GAF 改进拓扑控制算法

在军事应用中，对无线传感器网络拓扑控制算法提出了具有容错性、数据传输可靠性及良好的能量控制策略的更高要求。针对以上军事应用需求，研究者从以下几个方面对传统的 GAF 拓扑控制算法进行了改进。

#### 1) 虚拟网格划分

在移动通信系统中，常采用蜂窝形式划分虚拟网格，用以提高频率的复用度以及覆盖范围。因此在战场监测环境下，为尽可能增加通信及检测覆盖度，提高能量效率，可以考虑改变 GAF 改进拓扑控制算法中原有正方形虚拟网格结构，采用蜂窝（正六边形）虚拟区域结构。它将监测区域划分为若干个等边六边形，如图 6-3 所示。

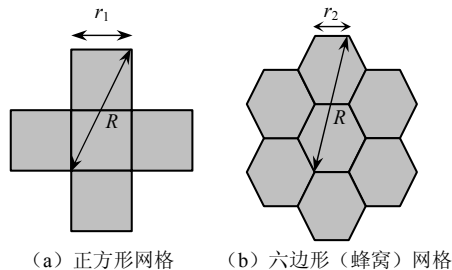


图 6-3 虚拟网格划分方式

假设在两种结构中，节点的通信半径均为  $R$ ，最大网格边长分别为  $r_1$  和  $r_2$ ，单跳信号覆盖最大面积分别为  $S_1$  和  $S_2$ 。在正方形结构中，为了保证相邻网格中的任意两个节点能够直接通信，相邻簇头之间的最远距离  $d$ ，应该满足

$$d \leq R \Rightarrow r_1 = R / \sqrt{2} \Rightarrow S_1 = 2r_1^2 = R^2 \quad (6.7)$$

同理，在蜂窝结构中，应满足

$$d \leq R \Rightarrow r_2 = R / \sqrt{3} \Rightarrow S_2 = 21\sqrt{3}R^2 / 26 \quad (6.8)$$

由此可以看出，采用蜂窝结构使得单跳信号覆盖面积增加约 40%，从而比正方形结构更加有效地使用传感器节点的能量。

## 2) 簇头选举机制

在传统 GAF 算法中,簇头是随机产生的,没有考虑节点剩余能量等信息。由于在改进的蜂窝结构中,同一网格的节点不再等价,节点在网格中的位置将直接影响其能否成为簇头。因此在簇头选举过程中,需要综合考虑节点的剩余能量和节点到网格中心的距离来选择合适的簇头。

在节点的剩余能量方面:考虑一个节点能否充当簇头的时候,最重要的是看该节点是否具有较大的剩余能量,通常以剩余能量与节点初始能量的比值作为衡量参数。

在节点到虚拟网格中心的距离方面:对于蜂窝结构,当簇头处于网格中心时,它与其他簇头之间通信所需要的能量消耗最小,所以在实际监测环境中,选举的簇头离网格中心距离越近,越能有效地使用能量,以达到降低通信能耗的目的。因此通常以虚拟网格半径与节点到其所在网格中心间距离的比值作为衡量参数。

可以将上述两个参数作为簇头选举的输入参数,以降低通信能量消耗和实现网络能量均衡。

## 3) 节点工作机制

如果按照 GAF 改进拓扑控制算法,竞争簇头失败的节点直接进入休眠状态,这一点并不符合陆战场实际感知应用需求,因此竞争簇头失败的节点不直接进入休眠状态,而是等待簇头节点发送的查询指令,然后簇内成员节点向簇头回复应答信息。簇头通过获取所有簇内成员节点的应答信息,将成员节点分为成员备份节点、簇头备份节点和活动节点三类。簇头节点设置成员备份节点的休眠时间以及簇头备份节点的休眠时间。休眠时间与簇头节点所带能量及能量消耗速度有关。在休眠时间设置完毕后,成员休眠节点、簇头备份节点在这段时间内会关掉无线通信和传感器设备。休眠时间会随着簇头能量的消耗而逐渐缩短。在此期间,活动节点监测目标区域,并实时向簇头上报业务报文。

当过了休眠时间后,休眠节点会打开它的无线通信设备,然后发送咨询信息给簇头,簇头通过自身能量以及活动节点能量,分析确定休眠节点是否继续休眠。如果能量允许,则重新设置休眠时间,并下达给这些节点,休眠时间的设置应保证休眠节点醒来时簇头有足够能量完成簇头的交替。如果簇头通过能量计算,确定簇头无足够能量继续担负簇头职责,则通过能量及距离因素在簇头备份节点中选择接替节点,同时将簇的管理工作交接给该节点。如果簇头通过能量计算,确定某些活动节点无足够能量持续完成监测任务,则会将该节点设置为成员备份节点,并设置其休眠时间。

### 6.1.4 启发式拓扑控制

无线传感器网络通常是面向应用事件驱动的网络,在没有异常事件发生时,骨干节点不必一直保持活跃状态。基于上述特点,研究者们提出了一类启发式的传感器节点唤

醒和休眠机制, 该机制能够使传感器节点在没有异常事件发生时关闭通信模块, 使其处于休眠状态; 而当检测到异常事件发生时能够及时自动唤醒自身和邻居传感器节点, 以形成数据转发的拓扑结构。启发式拓扑控制机制可以有效使节点的无线通信模块处于关闭状态, 使节点的传感器模块处于工作状态, 在不影响对异常事件检测的同时, 进一步降低了节点的能量开销。可以说, 该机制有效解决了传感器节点在睡眠状态和活动状态之间的转换问题, 同时该机制通常不能够独立作为一种拓扑控制机制, 需要与其他拓扑控制算法如功率型拓扑控制和层次型拓扑控制进行结合使用。

目前, 典型的启发式拓扑控制方法包括 STEM (Sparse Topology and Energy Management) 拓扑控制算法、ASCENT (Adaptive Self-Configuring Sensor Networks) 拓扑控制算法和 MCDS (Minimum Connected Dominating Set) 拓扑控制算法等, 本节将重点介绍 STEM 和 ASCENT 两种比较典型的拓扑控制算法。

### 1. STEM 拓扑控制算法

STEM 拓扑控制算法是较早提出的一种基于传感器节点唤醒机制的拓扑控制算法。在该算法中, 网络中的传感器节点采用一种简单有效的节点唤醒方式, 当检测到异常事件时, 能够以较小的时间延迟来实现网络通信的畅通, 从而保证数据及时转发。该算法包括 STEM-B 和 STEM-T 两种不同的机制。

#### 1) STEM-B 机制

STEM-B 机制的基本思想是: 当一个传感器节点需要向另外一个传感器节点发送数据时, 它作为主动节点先发送一串 beacon 数据包; 目标节点在收到 beacon 数据包后, 发送应答信号并自动进入数据接收状态; 主动节点接收到应答信号后, 进入数据发送模式。同时为了避免唤醒信号与数据通信的冲突, STEM-B 机制使用侦听信道与数据传输信道两个相分离的信道。

STEM-B 机制实现示意图如图 6-4 所示, 表示传感器节点 A 于一段时间内, 在侦听信道  $f_1$  和数据传输信道  $f_2$  上休眠/唤醒状态的转换过程。在  $t_1 \sim t_5$  时间段内, 节点 A 通过启发式唤醒机制与节点 B 和节点 C 进行通信, 如在  $t_1$  时刻, 节点 A 需要与邻居节点 B 进行数据传输通信, 因此传感器节点 A 首先在  $t_1$  时刻侦听信道  $f_1$  发送一串 beacon 数据包, 来唤醒节点 B, 直到在  $t_2$  时刻接收到节点 B 的应答信号为止; 然后节点 A 从  $t_2$  时刻开始, 在信道  $f_2$  发送数据给节点 B, 在  $t_3$  时刻通信结束后, 节点 A 使信道  $f_2$  处于休眠状态; 同时节点 A 在信道  $f_1$  上进行周期性侦听, 如在  $t_4$  时刻侦听到节点 C 发送的 beacon 数据包, 则节点 A 使信道  $f_2$  处于唤醒状态, 接收节点 C 发送的数据。可见, 如果没有数据通信时, 节点 A 大部分时间只保持在信道  $f_1$  上的周期性侦听, 从而在很大程度上降低了节点的能量消耗。

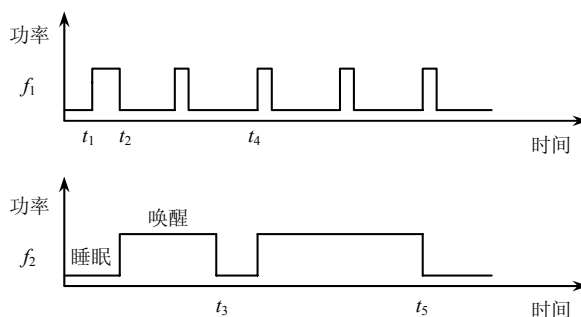


图 6-4 STEM-B 机制实现示意图

## 2) STEM-T 机制

STEM-T 机制相比 STEM-B 机制更加简单, 该机制要求传感器节点周期性进入侦听阶段, 探测是否有邻居节点要发送数据。当一个传感器节点需要与其某个邻居节点进行数据通信时, 首先发送一连串唤醒包, 并使发送唤醒包的时间长度大于侦听的时间间隔, 以确保邻居节点能够收到唤醒包; 然后接收到唤醒包的邻居节点进入接收数据状态, 传感器节点开始发送数据。如果节点在一段时间内没有接收到发送给自己的数据包, 则其自动进入睡眠状态。可见, STEM-T 机制通过增加节点唤醒次数来省略请求应答过程。

STEM 拓扑控制算法使传感器节点在整个生命周期内多数时间处于睡眠状态, 适用于类似战场环境监测或者战场突发事件监测等应用, 由事件触发引起传感器节点处于活动状态, 而不是要求传感器节点一直处于活动状态。但是, STEM 拓扑控制算法也给网络数据传输带来了传输延迟。

## 2. ASCENT 拓扑控制算法

ASCENT 拓扑控制算法也是一种基于节点唤醒的拓扑控制算法, 但是与 STEM 拓扑控制算法不同, 该算法关注的重点是均衡网络中骨干节点的数量并保证数据通路的畅通。具体实现思想是当传感器节点接收数据时若发现丢包严重, 则向数据源方向的邻居节点发送求助消息; 节点探测到周围的通信节点丢包率很高或者收到邻居节点发送的帮助请求时, 醒来后主动成为活动节点, 帮助邻居节点转发数据包。

在 ASCENT 拓扑控制算法中, 传感器节点可以处于休眠状态、侦听状态、测试状态和活动状态四种状态之一。其中, 休眠状态是指节点关闭通信模块, 能量消耗最小; 侦听状态是指节点只对信息进行侦听, 不进行数据转发; 测试状态是一个暂态, 指节点参与数据包转发, 并进行一定的运算, 判断自己是否变为活动状态; 活动状态是指节点参与数据包转发, 能量消耗最大。这四种状态之间的转换如图 6-5 所示。

图 6-5 中,  $NT$  表示节点的邻居数上限,  $LT$  表示丢包上限,  $T_s$  表示睡眠状态的定时器,  $T_p$  表示侦听态定时器,  $T_t$  表示测试态定时器,  $neighbors$  代表邻居数,  $loss$  代表丢包率,  $help$  代表求助消息。

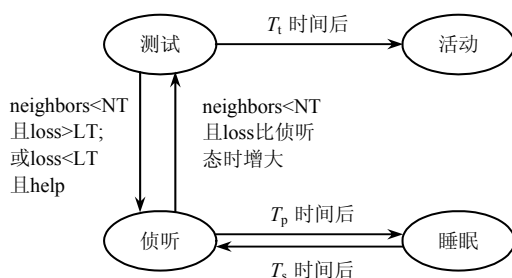


图 6-5 ASCENT 拓扑控制算法状态转换图

四种状态之间的转换关系如下：

(1) 休眠状态与侦听状态。处于休眠状态的节点设置定时器  $T_s$ ，当定时器超时后，节点由休眠状态进入侦听状态；处于侦听状态的节点设置定时器  $T_p$ ，当定时器超时后，节点由侦听状态进入休眠状态。

(2) 侦听状态与测试状态。处于侦听状态的节点侦听信道，如果发现当邻居数小于邻居数上限，且信道的平均丢包率大于丢包上限时，节点进入测试状态；或者当平均丢包率小于丢包上限，但接收到来自邻居节点的求助消息时，节点也进入测试状态。处于测试状态的节点在定时器  $T_t$  超时前发现邻居数超过邻居数上限，或者平均丢包率比该节点进入测试态前还大时，说明该节点不适合成为活动节点，它将进入测试状态。

(3) 测试状态与活动状态。处于测试状态的节点如果在定时器  $T_t$  超时前没有满足跳转到侦听状态的条件，则在定时器超时后进入活动状态，负责数据转发。

利用 ASCENT 拓扑控制算法，传感器节点能够根据网络情况动态地改变自身状态，从而动态地改变网络拓扑结构，并且节点只根据本地信息进行计算，不依赖无线通信模型和节点地理位置信息。但是 ASCENT 拓扑控制算法在面对大规模网络时，需要考虑负载均衡等技术。

### 6.1.5 混合型拓扑控制

混合型拓扑控制在利用分簇技术的基础上，综合应用功率分配技术或睡眠调度技术等以实现网络拓扑的优化与控制，进一步降低网络能量消耗。混合型拓扑控制方法综合利用了多种拓扑控制技术，以满足无线传感器网络拓扑控制所要求的  $k$  连通性、 $k$  覆盖性、可扩展性和容错性等。

目前，典型的混合型拓扑控制方法包括 SPAN 拓扑控制算法、CLUSTERPOW 拓扑控制算法、HTCC (Heuristic Topology Control based on Cluster) 拓扑控制算法等，本节将重点介绍 SPAN 拓扑控制算法和 CLUSTERPOW 拓扑控制算法两种比较典型的混合型拓扑控制方法。

### 1. SPAN 拓扑控制算法

SPAN 拓扑控制算法综合应用分簇技术和睡眠调度技术,在维持网络连通性的前提下,优化网络能量消耗。SPAN 拓扑控制算法的基本思想是:在不破坏网络连通性的基础上,根据节点的剩余能量、邻居个数和节点的效用等多种因素,自适应地决定是成为骨干节点还是进入睡眠状态;睡眠节点则周期性苏醒,以判断自身是否应该成为骨干节点;骨干节点周期性地判断自己是否应该退出骨干网络。

SPAN 拓扑控制算法的实现主要包括骨干节点选取和骨干节点退出两个步骤,如图 6-6 所示。

#### 1) 骨干节点选取规则

如果一个睡眠节点的任意两个邻居不能直接通信或通过一两个骨干节点间接通信,则该节点就应该成为骨干节点。同时为了有效避免多个睡眠节点同时弥补一个空缺的骨干节点,SPAN 拓扑控制算法采用延时机制,即节点在宣布成为骨干节点之前延时一段时间。在延时一段时间之后,如果该节点没有收到其他节点成为骨干节点的消息,它则宣布自己成为骨干节点;如果该节点收到其他节点成为骨干节点的消息,则需要重新判断是否满足骨干节点选取规则,当且仅当其仍满足选取规则时,宣布自己成为骨干节点。

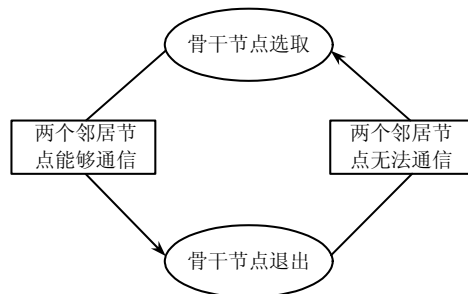


图 6-6 骨干节点选取与退出转换图

为了获得较为合理的延时机制,SPAN 拓扑控制算法采用的延时计算公式为

$$\text{delay} = [(1 - \frac{E_r}{E_m}) + (1 - U_i) + R]N_iT, \quad U_i = C_i / \left\lfloor \frac{N_i}{2} \right\rfloor \quad (6.9)$$

式中,  $E_r$  表示节点的剩余能量,  $E_m$  表示节点最大能量,  $U_i$  表示节点  $i$  的效用,  $R$  为区间  $[0, 1]$  上的随机数,  $N_i$  表示节点  $i$  的邻居个数,  $T$  表示一个消息在无线链路上的往返延时,  $C_i$  表示在节点  $i$  成为骨干节点时增加的连通邻居对的个数。

#### 2) 骨干节点退出规则

如果一个骨干节点的任意两个邻居能够直接通信或通过其他工作节点间接通信,那么该骨干节点应该退出并进入睡眠状态。为了保证公平性和网络能量均衡,一个骨干节点在工作一段时间后,如果它的任意两个邻居可以通过其他邻居通信,即使这些邻居不是骨干节点,则它也应该退出。同时为了避免网络连通性遭到临时破坏,节点在宣布退出骨干节点之后,仍允许路由协议在新的骨干节点选出之前继续使用原来的骨干节点。

通过上述分析可知,SPAN 拓扑控制算法对传感器节点没有特殊要求,很好地保证了网络的连通性,有利于对异常检测事件信息的快速上报,因此可应用于重要环境检测领域。但是,随着传感器节点密度的增加,SPAN 拓扑控制算法的节能效果会越来越差。

## 2. CLUSTERPOW 拓扑控制算法

为克服 COMPOW 拓扑控制算法不适用于非均匀节点分布的情况,研究者提出了 CLUSTERPOW 拓扑控制算法,该算法综合利用分簇技术和差异性功率分配技术来优化网络拓扑控制,在保证网络连通性、网络容量的基础上,有效提高了网络能量的使用效率。该算法的基本思想是:依照所处不同功率等级时节点间的直接可达关系,表述为不同拓扑层次的簇,从而转化为节点间的路由关系;在数据转发通信中,节点根据该层次分簇关系能够切换至适当功率,以避免 COMPOW 拓扑控制算法中因极少数偏远节点而造成全体节点采用大功率的情形。

CLUSTERPOW 拓扑控制算法的分簇通信示意图如图 6-7 所示。在传统的 COMPOW 拓扑控制算法中,簇  $C_1$  中所有传感器节点采用的发射功率为 1mW,当传感器节点  $w$  加入网络时,簇  $C_1$  中的剩余传感器节点必须采用 100mW 的发送功率与节点  $w$  进行通信,从而导致簇  $C_1$  的最小发射功率设置为 100mW。为了解决上述问题,CLUSTERPOW 拓扑控制算法将拓扑控制与路由选择相结合,当传感器节点  $u$  需要转发一个数据包到目的节点  $v$  时,该节点计算获得最小的发射功率以保证数据包可以通过多跳方式达到目的节点。如图 6-7 所示,三层分簇对应的发射功率分别为 1mW、10mW 和 120mW,为了将数据包从传感器节点  $u$  转发到目的节点  $v$ ,首先 100mW 发射功率被选用,直到数据包到达 10mW 的簇;然后 10mW 发射功率被选用,直到数据包到达 1mW 的簇;最后选择 1mW 发射功率将数据包转发给目的节点。

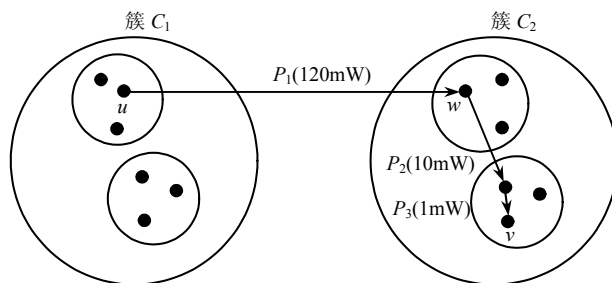


图 6-7 CLUSTERPOW 拓扑控制算法分簇通信示意图

CLUSTERPOW 拓扑控制算法在运行过程中,进行了隐含分簇,分簇操作通过给定功率层的可达性来实现。CLUSTERPOW 拓扑控制算法在取得非均匀节点分布条件下优良性能的同时,增加了网络通信的开销。

## 6.2 时间同步技术

时间同步 (Time Synchronization) 技术是实现无线传感器网络及其应用的重要支撑技术之一。无线传感器网络是一种分布式网络,并没有全局时钟来为地理位置分散的节



点提供统一的时间基准,节点对时间的认知来自于各自维护的本地时钟。然而不同传感器节点的晶体振荡器频率存在差异,再加上外界环境(如电磁干扰、温度高低、电压变化和晶体老化等)的影响,使得在同一时刻,不同节点的本地时间值不尽相同。为使无线传感器网络协同工作(如环境感知、信息采集和目标监视等任务),必要求网络内节点实现不同程度的时间同步,使节点相互协作地完成目标任务。

### 6.2.1 时间同步技术的特点及分类

无线传感器网络是一种协作式网络,时间同步是节点之间协同合作、准确无误完成信息采集、信息处理和信息传输的重要保证。无线传感器网络中依赖于时间同步的应用和协议包括如下所述内容。

(1) 节点数据压缩融合。数据融合是利用数据的时间相关性剔除冗余的数据,以减少通信量,或根据数据采集时间来确定不同节点数据间的时序关系,以便融合多节点的观测数据来提取高层次物理量信息。实现节点的时间同步是实施数据压缩融合应用的前提条件,而且时间同步精度会对数据压缩融合的性能产生关键性的影响。

(2) 节点的测距定位。测距定位算法需要测量定位信号发出和到达的时间差,从而获得节点之间的距离,然后利用三角定位方法获得节点的位置信息。可见,时间同步的精度和节点定位精度密切相关。

(3) 时分多路复用。无线传感器网络中的时分多路复用技术,是通过给每个节点分配时间槽来完成节点之间的通信,这需要网络中所有的传感器节点保持一个统一的时间。

(4) 节点状态切换。为了节省能量,网络中节点的状态是在活动、空闲和睡眠状态之间切换的,为了使全网节点的状态切换连贯一致,需要全网节点保持一个统一的时间。

(5) 与协作相关的应用及协议,包括协作传输、安全协议、数据库查询、与用户交互和系统调度有关的日志时间等都需要传感器节点间精确的时间同步。

无线传感器网络应用的多样化使得时间同步成为一个关键性的基础服务,同时也给时间同步提出了诸多不同的要求,体现在对时间同步的精确度、寿命、范围、可用性以及能量开销等方面的差异。例如,在军事应用中,对于战场环境的监测需要精确的时间同步;局部协作只需要邻居节点间的时间同步,而全局协作则需要全局的时间同步;事件触发可能仅需要瞬时同步,而数据记录或调试则经常需要长期的时间同步;与外部用户的通信需要绝对时间的同步,而网内数据处理仅需要相对时间同步。

可见,无线传感器网络应用的多样化,导致其对时间同步的需求也多样化。但是无线传感器网络有其自身的局限性,如能量有限、要求可扩展性、要求动态自适应性等,这些局限使得在无线传感器网络中实现时间同步有着很大的困难,也使得传统的时间同步方案不适合无线传感器网络。Internet 上广泛使用的网络时间协议(Network Time

Protocol, NTP), 只适用于结构相对稳定、物理链路相对稳定的有线网络系统; 全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 能够以纳秒级的精度与世界标准时间保持同步, 但需要配置固定的高成本接收机, 并且在室内、森林或水下等有遮盖物的环境中也无法使用, 如果应用于军事目的, 没有主控权的 GPS 系统也是不可依赖的。因此, 这些时间同步方法都不适用于无线传感器网络。

与传统网络相比, 无线传感器网络在能量感知、稳定性和鲁棒性、可扩展性、收敛性等方面对时间同步算法研究提出了新的要求。

#### 1) 能量感知

为了减少能量消耗, 保持网络时间同步的交换消息数需尽量少, 并可预知必需的网络通信和计算负载。时间同步机制应该根据网络节点的能量分布, 均匀使用网络节点的能量来达到能量的高效使用, 在满足用户同步精度要求的同时尽量减少通信量和降低计算复杂度以节省能量。

#### 2) 稳定性和鲁棒性

无线传感器网络在保持连通性的同时, 因环境影响以及节点本身的变化, 网络拓扑结构将动态变化, 时间同步机制要能够在拓扑结构的动态变化中保持时间同步的连续性和精度的稳定性。同时传感器节点失效和现场环境随时都可能影响无线链路的通信质量, 因此要求时间同步机制具有良好的鲁棒性。

#### 3) 可扩展性

在无线传感器网络应用中, 网络部署的地理范围大小不同, 网络内节点密度不同, 时间同步机制要能够适应这种网络范围或节点密度的变化。

#### 4) 收敛性

无线传感器网络具有拓扑结构动态变化的特点, 同时传感器节点又存在能量约束, 这些都要求建立时间同步的时间很短, 使节点能够及时知道它们的时间是否达到同步。

早期提出的时间同步算法致力于提高同步精度和实现全网同步。它们通过分析节点的通信传输延迟提高时间戳标记的准确度, 减少了延迟不确定性对时间同步精度的不利影响, 并在此基础上构造如生成树等集中式、平面型路由结构, 来向节点发送包含网络参考时间的同步消息, 从而实现全网同步。比较著名的集中式时间同步算法包括采用接收—接收同步模式的参考广播同步 (Reference Broadcast Synchronization, RBS) 算法、改良 NTP 协议的传感器网络时间同步 (Timing-sync Protocol for Sensor Networks, TPSN) 协议、基于树形路由的 MS/TS (Mini-Sync/Tiny-Sync) 算法和 LTS 算法、泛洪时间同步协议 (The Flooding Time Synchronization Protocol, FTSP), 以及轻量级双信道时间同步 (Lightweight Bidirectional Time Synchronization, TSynC) 算法等。

在实现了一定精度的全网时间同步后, 无线传感器网络时间同步的研究重心转移到

了提高时间同步服务及其他方面的性能上，相继出现了旨在降低同步开销的层次型时间同步算法，旨在提高同步可扩展性和鲁棒性的分布式时间同步算法，强调安全性的时间同步算法，利用超宽带信道和跨层设计实现极高精度的时间同步算法，以及基于异构网络和小世界网络模型的时间同步算法。

纵观目前的时间同步算法，按照同步的实现机制可以将时间同步算法分为接收者—接收者（Receiver—Receiver）时间同步、发送者—接收者（Sender—Receiver）双向时间同步和发送者—接收者单向时间同步三类。本节将从这三个方面介绍其中典型的无线传感器网络时间同步算法。

### 6.2.2 接收者—接收者时间同步算法

基于接收者—接收者的同步算法基本思想是利用无线数据链路层的广播信道特性，一个节点广播消息，接收到广播消息的节点通过比较接收到消息的本地时间来实现同步。这种同步方式通过比较接收节点之间的时间消除了发送节点中发送时间和访问时间带来的不确定性延迟，提高了同步精度。然而这种同步实现的是接收节点之间的相对同步，发送节点不能被同步，同时消息的通信和处理负担较重。参考广播同步（Reference Broadcast Synchronization, RBS）算法是其典型代表。

RBS 算法的基本思想是利用无线信道的广播特性，由“第三方”参考节点广播时间同步消息，多个接收节点接收同一时间同步消息，然后通过比较各自接收的时间同步消息的本地到达时间，来实现相互之间的同步，如图 6-8 所示。

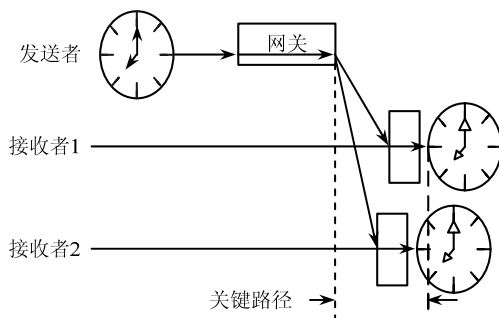


图 6-8 RBS 算法运行机制

其具体过程是：发送节点广播一个信标分组，广播域中两个节点都能够接收到这个分组。每个接收节点分别根据自己的本地时间记录接收到信标分组的时刻，然后交换它们记录的信标分组接收时间。两个接收时间的差值相当于两个接收节点间的时钟差值，其中一个接收节点可以根据这个时间差更改它的本地时间，从而达到两个接收节点的时间同步。

可见，RBS 算法不是通告发送节点的时间值，而是通过广播同步指示分组实现接收

节点间的相对时间同步。信标分组本身并不需要携带时标，何时准确地发送出去也不是非常重要。正是由于无线信道的广播特性，信标分组相对所有接收节点而言，将其同时发送到物理信道上，才能够去除发送时间和访问时间引入的时间同步误差。RBS 算法运行机制通过去除这两个主要误差源来提高时间同步的精度。

而影响 RBS 算法同步性能的主要因素包括接收节点间的时钟偏差、接收节点非确定因素和接收节点的个数等。为了提高时间同步精度，RBS 算法采用了统计技术，通过发送节点发送多个消息，从而获得接收节点之间的时间差异的平均值。对于时钟偏差问题，采用了最小平方的线性回归 (Least Squares Linear Regression, LSLR) 方法进行线性拟合，其中直线斜率就是两个节点的时钟频偏，直线上的点表示节点间的时间差异，RBS 算法时间同步模型如图 6-9 所示。

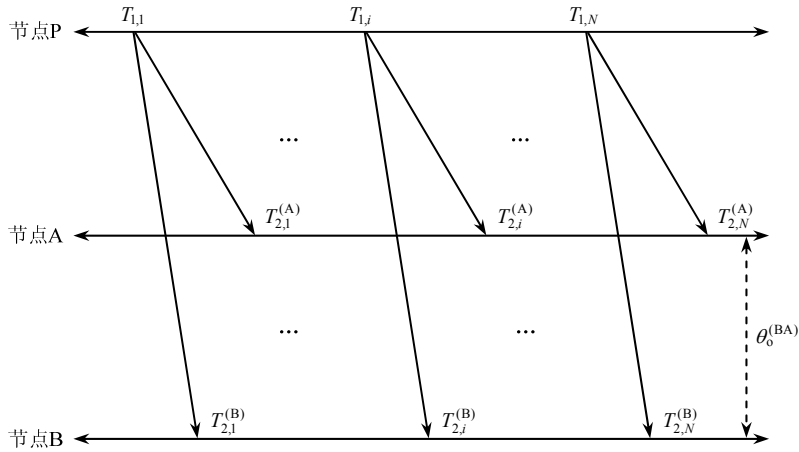


图 6-9 RBS 算法时间同步模型

假设在一个簇内，存在一个标记节点 P 和多个传感器节点，其中 A 节点和 B 节点是任意两个传感器节点，假设节点 A 和节点 B 分别在时刻  $T_{2,i}^{(A)}$  和  $T_{2,i}^{(B)}$  接收到标记节点 P 的第  $i_{th}$  广播报文，其中  $T_{2,i}^{(A)}$  和  $T_{2,i}^{(B)}$  分别为节点 A 和节点 B 用自己的本地时钟记录的各自广播报文的接收时间；然后节点通过广播方式交换它们记录的广播报文接收时间。其中， $T_{2,i}^{(A)}$  可以表示为

$$T_{2,i}^{(A)} = T_{1,i} + d^{(PA)} + X_i^{(PA)} + \theta_0^{(PA)} + \theta_s^{(PA)} \cdot (T_{1,i} - T_{1,1}) \quad (6.10)$$

式中， $T_{1,i}$  为传送时间， $d^{(PA)}$  为从节点 P 到节点 A 的确定性延迟分量， $X_i^{(PA)}$  为从节点 P 到节点 A 的非确定性延迟分量， $\theta_s^{(PA)}$  和  $\theta_0^{(PA)}$  分别是节点 A 和节点 P 的相对频偏和相位差。

同理可以获得  $T_{2,i}^{(B)}$  的表达式为

$$T_{2,i}^{(B)} = T_{1,i} + d^{(PB)} + X_i^{(PB)} + \theta_0^{(PB)} + \theta_s^{(PB)} \cdot (T_{1,i} - T_{1,1}) \quad (6.11)$$

两式相减获得如下表达式

$$T_{2,i}^{(A)} - T_{2,i}^{(B)} = d^{(PA)} - d^{(PB)} + X_i^{(PA)} - X_i^{(PB)} + \theta_0^{(BA)} + \theta_s^{(BA)} \cdot (T_{1,i} - T_{1,1}) \quad (6.12)$$

式中,  $\theta_s^{(BA)} = \theta_s^{(PA)} - \theta_s^{(PB)}$  和  $\theta_0^{(BA)} = \theta_0^{(PA)} - \theta_0^{(PB)}$  为节点 A 和节点 B 的相对频移和相位差。通常, 非确定性延迟分量  $X_i^{(PA)}$  和  $X_i^{(PB)}$  用均值为  $\mu$  和方差为  $\sigma^2/2$  的高斯随机变量描述。

假设噪声分量为  $z[i]$ , 则可表示为

$$z[i] = \mu' + X_i^{(PA)} - X_i^{(PB)} \quad (6.13)$$

式中,  $\mu' = d^{(PA)} - d^{(PB)}$ , 并且  $z[i] \sim N(\mu', \sigma^2)$ 。

通过定义  $x[i] = T_{2,i}^{(A)} - T_{2,i}^{(B)} - \mu'$  和  $w[i] = z[i] - \mu'$ , 可以用下面的矩阵形式表示任意两个节点之间观测数据的集合为

$$X = H\theta + W \quad (6.14)$$

式中

$$\begin{cases} X = [x[1] & x[2] & \cdots & x[N]]^T \\ W = [w[1] & w[2] & \cdots & w[N]]^T \\ \theta = [\theta_0^{(BA)} & \theta_s^{(BA)}]^T \\ H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 0 & T_{1,2} - T_{1,1} & \cdots & T_{1,N} - T_{1,1} \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (6.15)$$

利用估计理论方法, 如最小平方估计的方法可以对相对频偏和相位差进行估计。获得的最小方差无偏估计 (Minimum Variance Unbiased, MVU) 为

$$\begin{bmatrix} \theta_0^{(BA)} \\ \theta_s^{(BA)} \end{bmatrix} = \frac{1}{N \sum_{i=1}^N D_i^2 - [\sum_{i=1}^N D_i]^2} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N D_i^2 \sum_{i=1}^N x[i] - \sum_{i=1}^N D_i \sum_{i=1}^N (D_i \cdot x[i]) \\ N \sum_{i=1}^N (D_i \cdot x[i]) - \sum_{i=1}^N D_i \sum_{i=1}^N x[i] \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

式中,  $D_i = T_{1,i} - T_{1,1}$ 。如果不考虑相对频偏, 即假设  $\theta_s^{(BA)} = 0$ , 则相位差的最大似然估计为

$$\hat{\theta}_0^{(BA)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [T_{2,i}^{(A)} - T_{2,i}^{(B)}] \quad (6.17)$$

总体来看, RBS 算法的缺点是对网络有一定的要求, 它不适合点对点通信的网络, 且要求网络有物理广播信道; 其次, 它的扩展性不好, 因为节点间本地时间戳通信需要额外的消息交换次数, 因此不能很好地应用到大规模的多跳网络中; 最后, RBS 算法需要较多的交换次数, 对于具有  $n$  个节点的单跳网络, 需要  $O(n^2)$  的消息交换, 如果  $n$  的值很大时, 消息交换次数是相当多的, 导致节点的计算开销也非常之大。

### 6.2.3 发送者—接收者双向时间同步算法

基于发送者—接收者的双向时间同步算法采用 C/S 模式，通过同步节点和已同步节点间的双向消息交换来实现同步，具有同步精度高的优点。其比较典型的算法包括传感器网络定时同步（Timing-Sync Protocol for Sensor Networks, TPSN）算法和基于树的轻量级同步（Lightweight Tree-based Synchronization, LTS）算法和异步扩散同步（Asynchronous Diffusion, AD）算法等。

相比其他同步算法，LTS 算法是一种多跳时间同步方法，其设计目标不是最大化同步精度，而是在给定同步精度条件下最小化同步复杂度，因此更有利于降低节点的通信和计算开销，减少网络的能量消耗，同时具有鲁棒性和自配置的特点，能够满足无线传感器网络军事应用的部分需求。因此本节重点介绍 LTS 算法。

LTS 算法有集中式和分布式两种多跳时间同步算法，这两种算法均建立在单跳节点同步的基础上，要求节点与网络中的一些参考节点保持同步。LTS 算法单跳节点间的同步过程如图 6-10 所示。

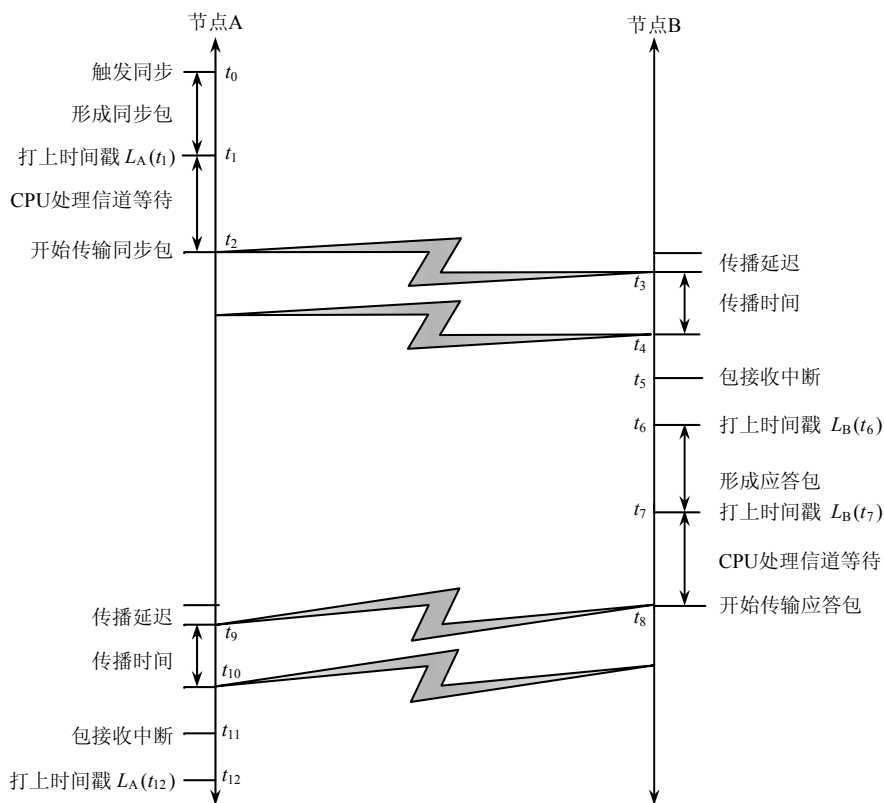


图 6-10 LTS 算法单跳节点间的同步过程

LTS 算法时间同步过程主要包含以下步骤：

- (1) 节点 A 在  $t_0$  时刻触发, 与节点 B 进行时间同步;
- (2) 节点 A 在  $t_1$  时刻形成时间同步包, 并在包中打上节点 A 的本地时间戳  $L_A(t_1)$ ;
- (3) 随后节点 A 把同步包移交给 CPU 和协议栈进行处理, 经过一段时间的信道等待后 (此等待时间往往具有很大的不确定性), 在  $t_2$  时刻开始同步包的传输;
- (4) 经过一段时间后, 节点 B 在  $t_4$  时刻完成了最后一个字节的接收,  $t_4 = t_2 + \xi + t_p$ , 其中  $\xi$  为传播延迟,  $t_p$  为数据包的传输时间;
- (5) 在经过一段时间的接收中断后, 在  $t_6$  时刻打上时间戳  $L_B(t_6)$ ;
- (6) 节点 B 经过与节点 A 相同处理后形成了一个应答包, 并打上本地时间戳  $L_B(t_7)$ , 经过 CPU 的处理和信道等待后, 再传回给节点 A, 包中含有时间戳  $L_A(t_1)$ 、 $L_B(t_6)$  和  $L_B(t_7)$ ;
- (7) 在  $t_{10}$  时刻, 接收完毕最后一个字节, 经过中断延迟, 在  $t_{12}$  时刻, 节点 A 打上时间戳  $L_A(t_{12})$ 。

基于上面的双节点包交换过程, 来分析节点 A 是如何知道它与节点 B 之间的时钟偏移量的。定义时钟偏移量为  $\Delta t$ , 则  $\Delta t = L_A(t_6) - L_B(t_6)$ , 接下来求取  $L_A(t_6)$ , 并做如下假设。

假设 1: 在  $t_1$  与  $t_6$  之间存在传播时延  $\xi$  和传送时间  $t_p$ ;

假设 2: 传送应答包时, 在  $t_6$  与  $t_{12}$  之间也存在同样的传播时延  $\xi$  和传送时间  $t_p$ ;

假设 3: 由于节点 A 与节点 B 具有相同的硬件条件和网络条件, 所以在数据包的两个传输方向上, CPU 处理、包接收中断和信道等待的时间应该是相同的。

基于以上假设可以获得  $L_A(t_6)$  的表达式为

$$L_A(t_6) = \frac{L_A(t_1) + \xi + t_p + L_A(t_{12}) - \xi - t_p - (L_B(t_7) - L_A(t_6))}{2} \quad (6.18)$$

由此可以获得时钟偏移量  $\Delta t$  为

$$\Delta t = L_A(t_6) - L_B(t_6) = \frac{L_A(t_1) + L_A(t_{12}) - L_B(t_7) - L_A(t_6)}{2} \quad (6.19)$$

这样, 节点 A 可以根据计算出来的时钟偏移量调整自己的时钟, 可见整个过程需要传送两次数据包。

基于上述单跳节点同步方式, 集中式 LTS 算法和分布式 LTS 算法分别按照不同的机制实现了网络范围内的节点同步。其中, 集中式 LTS 算法是单跳同步算法的简单线性扩展, 其基本思想是: 在网络中构造低深度的生成树, 然后以树根为参考节点, 依次向叶节点进行逐级同步, 最终达到全网同步。在集中式同步协议中, 生成树的根是参考节点, 在需要时辅助启动“再同步”过程。再同步的时间间隔取决于节点所期望的同步精度、网络瞬时同步精度以及节点的时钟漂移。集中式同步算法在每次同步时都会构建新的生成树, 它对于信道动态变化、节点失效和节点移动等具有较高的鲁棒性。

分布式 LTS 算法以分布方式实现全网的同步。在同步过程中, 每个节点取决于它自己的同步时间, 该算法不需要使用生成树。节点  $j$  在需要重新进行同步时, 就发送同步请

求到最近的参考节点。然后,沿着从参考节点到节点 $j$ 路径上的所有节点,采用单跳节点同步方式,逐跳实现与参考节点的时间同步。由于节点自己决定是否需要同步,从而有效减少了不必要的同步开销。另一方面,同步请求沿着到参考节点的路径传送,路径上的所有节点都需要进行同步,随着同步请求的增加,这类路径上进行的所有同步会浪费大量的网络资源。为了解决这个问题,分布式 LTS 算法引入了“合并同步请求”和“路径多元化”方法。其中,“合并同步请求”方法是:当一个节点需要请求同步时,它首先向其邻近的节点查询是否存在未决请求;如果存在,则将该节点的同步请求与这些未决请求合并,从而减少同一路径上两个独立同步请求可能造成的低效率。路径多元化方法是:当一个节点向最近的参考节点发送同步请求消息时,它将选择一条合适的路径,使得在一定时间内有更多的其他节点被动地进行同步。

通过上述分析,可知 LTS 算法可以为低成本、低复杂度的无线传感器网络提供最小化能量开销的时间同步,同时具备一定的鲁棒性,在节点失效、信道动态变化和节点移动的情况下,实现网络的正常同步。相对而言,当所有节点需要同时进行时间同步时,集中式 LTS 算法更为高效;当部分节点需要频繁同步时,分布式 LTS 算法较为优越。

#### 6.2.4 发送者—接收者单向时间同步算法

基于发送者—接收者的单向时间同步算法的基本原理是:发送节点发送一个包含本地发送时间戳的时间同步消息,接收节点用本地时钟记录接收时间并取出同步消息中的时间戳,然后调整自身时钟与同步节点时间同步。目前,基于该方法的典型算法包括延迟测量时间同步(Delay Measurement Time Synchronization, DMTS)算法和洪泛时间同步(Flooding Time synchronization Protocol, FTSP)算法,下面重点介绍 DMTS 算法。

DMTS 算法的实现策略是牺牲部分时间同步精度,换取较低的计算复杂度和能耗。接收节点通过测量从发送节点到接收节点的单向时间延迟,并结合发送节点中的时间戳来计算出时间调整值,是一种轻量的能量有效的的时间同步算法。其实现基本原理是:选择一个节点作为时间主节点广播时间同步消息,所有接收节点测量这个时间广播消息的延迟,设置自己的时间为接收到消息携带的时间,加上这个广播消息的传输延迟,这样所有接收到消息的节点都与主节点进行了时间同步。DMTS 算法同步原理如图 6-11 所示。

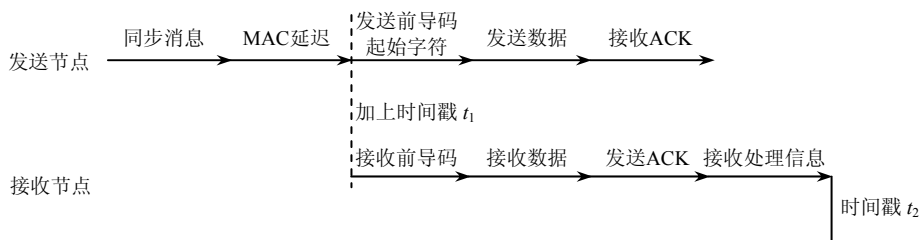


图 6-11 DMTS 算法同步原理



图 6-11 所示的基本过程是：同步发送节点在监听到信道空闲后广播时间同步分组，同时在 MAC 层给分组加上发送时间戳  $t_0$ ，以此来消除发送节点引入的处理延迟和 MAC 层的介质访问延迟。为了使接收节点进行接收同步，发送节点在广播时间同步分组前发送前导码和起始字符。接收节点则根据发送一个比特位需要的时间  $t$  和发送的信息位个数，计算出发送前导码和起始字符需要的时间为  $nt$ 。接收节点接收到广播分组到达信息后，用本地时钟记录接收到广播分组到达时刻的时间戳  $t_1$ ，并记录接收节点在调整自己的时钟之前的那一时刻记录的本地时间  $t_2$ ，则发送节点和接收节点的时间延迟  $t_d$  可表示为

$$t_d = nt + (t_2 - t_1) \quad (6.20)$$

式中， $nt$  表示为发送前导码和起始字符所需要的时间， $n$  为发送的信息位个数， $t$  为发送一位所需的时间； $t_2 - t_1$  为接收处理的延迟。

总体而言，DMTS 算法采用层次型分级结构来实现全网同步到一个时间主节点，下一级的节点通过接收上一级节点广播的时间消息分组，计算出与上一级节点的时钟偏差并同步到上一级节点，该算法进行一次全网同步需要的广播分组总个数等于网络中所有节点个数之和。相比 RBS 算法，DMTS 算法的同步精度略有下降，但是由于其是一种轻量级同步算法，因此在网络能量和算法复杂度等方面都具有明显的优势，可以应用于同步精度要求不太苛刻的无线传感器网络中。

## 6.3 节点定位技术

节点定位是无线传感器网络应用的基础和关键技术之一。在无线传感器网络的诸多应用中，位置信息至关重要，事件发生的位置或获取信息的节点位置是传感器监测消息中所包含的重要信息，没有位置信息的监测消息往往毫无意义。其次，节点位置还可以用于目标定位、目标跟踪和目标轨迹预测，实现对网络覆盖区域其他目标的定位和跟踪。此外，无线传感器网络的路由选择、拓扑控制等功能，也需要节点的位置信息来提高控制效率、改善网络性能。然而由于受成本、功耗、计算能力等问题的限制，传统网络中使用的节点定位技术并不适合无线传感器网络。因此，节点定位成为无线传感器网络的一个重要方向。

### 6.3.1 节点定位特点及分类

无线传感器网络中负责感知或监测的传感器节点一般被随机部署在特定的监控区域内（如通过飞机和炮弹等散布），节点的部署位置具有不可控制性，网络中大多数节点的位置不能事先确定；其次，在实际应用中，由于网络中节点数量巨大，依靠人工标定的

方式并不切合实际；最后，对于目前应用最广泛、最成熟的定位技术——GPS，由于其能耗高、体积大和成本高等特点，并不适合在大规模低成本传感器节点上配置使用，特别是在战争环境下，GPS 受制于人，其服务将会受到限制，从而导致无线传感器网络定位精度严重下降。因此，针对无线传感器网络自身特点，研究和开发适合于无线传感器网络应用的节点定位技术已经成为学术界和工业界研究的重点。

在无线传感器网络中，传感器节点通常分为信标节点（Beacon Node）和未知节点（Unknown Node）两类。其中信标节点又称为锚节点，是指自身位置已知的传感器节点，可以为其他节点提供位置参考，在一个传感器网络中，信标节点在网络节点中所占的比例很小，一般是通过手工配置或根据其他定位装置（如 GPS）等来获取自身的位置信息；未知节点是指不知道自身位置的传感器节点。

节点定位是指传感器节点根据网络中少数信标节点，通过一定的定位技术确定自身或网络中其他节点的绝对位置或相对位置的过程。因此，节点定位通常分为节点自身定位和目标节点定位两种类型。节点自身定位是确定网络节点自身坐标位置的过程，而目标节点定位是确定网络覆盖区域内某个事件或目标节点坐标位置的过程。通常，节点自身定位是目标定位的基础。

与传统的定位技术相比，由于传感器节点计算能力、成本和能量等方面的限制，无线传感器网络节点定位技术必须满足以下所述要求。

（1）自组织特性。通常网络中的节点为随机部署，没有基础设施的支持，所以要求定位算法具有自组织特性，不能依靠全局的基础设施协助定位。

（2）健壮性。由于传感器节点的硬件配置低，能量供给有限，可靠性差，所以测量距离（或角度）时会产生误差，其定位算法必须具有较好的容错性。

（3）能量高效。传感器节点能量受限，需要尽可能地减少定位算法的复杂性，减少节点间的通信开销，以尽量延长网络的生存周期。

（4）分布式计算。由于传感器节点的数量通常较多，定位算法不适合由单个节点集中来完成，这就要求每个节点能够分布式计算“自身”或其他节点的位置。

到目前为止，针对无线传感器网络定位算法的分类主要有以下三种分类。

#### 1) 基于距离的定位算法和距离无关的定位算法

根据定位过程中是否测量实际节点间的距离，将定位算法分为基于距离的定位算法和距离无关的定位算法两种。前者需要测量相邻节点间的绝对距离或方位，并利用节点间的实际距离来计算未知节点的位置；后者无须测量节点的绝对距离或方位，而是利用节点间的估计距离计算节点位置。

#### 2) 绝对定位和相对定位

绝对定位与物理定位类似，定位结果是一个标准的坐标位置，如经纬度。而相对定

位通常是以网络中部分节点为参考,建立整个网络的相对坐标系统。绝对定位可为网络提供唯一的命名空间,受节点移动性影响较小,有更广泛的应用领域。但研究发现,在相对定位的基础上也能够实现部分路由协议,尤其是基于地理位置的路由,并且相对定位不需要信标节点。

### 3) 集中式定位与分布式定位

集中式定位就是指把所需信息传送到某个中心节点,并在那里进行节点定位计算;分布式定位是指依赖节点间的信息交换和协调,通过节点自行计算获得自身位置信息的定位方式。集中式定位的优点在于从全局角度统筹规划,计算量和存储量几乎没有限制,可获得相对精确的位置估算。它的缺点包括与中心节点位置较近的节点会因为通信量大而过早消耗完能量,导致部分节点“死亡”。

不过相对来说,定位算法较为主流的分类方法是按照定位过程中是否测量距离的方式来划分,因此本节从基于距离的定位算法和距离无关的定位算法两种类型入手,介绍目前比较有代表性的节点定位方法。

## 6.3.2 基于距离的定位算法

基于距离的定位算法是通过测量相邻节点间的实际距离或方位进行定位,其实现过程通常分为三个阶段:第一个阶段是测距阶段,未知节点首先测量到邻居节点的距离或角度,然后进一步计算到邻居信标节点的距离或方位;第二个阶段是定位阶段,未知节点在计算出到达三个或三个以上信标节点距离或角度后,计算未知节点的坐标;第三个阶段是修正阶段,对求得的节点坐标进行求精,提高定位精度,减少误差。

目前,基于距离的定位算法主要包括基于到达时间(Time of Arrival, TOA)、基于到达时间差(Time Differential of Arrival, TDOA)、基于到达角度(Angle of Arrival)、基于接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)和基于线性调频扩频(Chirp Spread Spectrum, CSS)的定位算法等。下面具体介绍基于 TOA、基于 TDOA 和基于 RSS 的几种定位算法。

### 1. 基于 TOA 的定位算法

基于 TOA 的定位机制是根据信号的传播速度和时间来计算节点间的距离,然后利用已知算法计算出节点的位置。其基本实现过程如下:对于二维平面,可假设信标节点的坐标为  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ ,  $n$  为信标节点的个数,未知节点的坐标为  $(x, y)$ ;当整个无线传感器网络时间同步精度达到要求时,信标节点在各自时间周期内向未知节点发送测距信号,未知节点根据测距信号获得自身距离信标节点之间的距离,并建立如下方程组

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = r_1^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = r_2^2 \\ \dots\dots \\ (x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 = r_n^2 \end{cases} \quad (6.21)$$

式中,  $r_i = v \times \Delta t$ ,  $v$  为测距信号在空间传播的速度,  $\Delta t$  为信标节点发送测距信号的时间与未知节点接收到同一测距信号的时间之间的差值。基于上述方程组, 未知节点可采用三边算法或最大似然估计算法计算出自身位置。将上述方程进行转换, 按照最大似然估计算法进行计算, 即

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = r_1^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = r_2^2 \\ \dots\dots \\ (x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 = r_n^2 \end{cases} \Rightarrow \mathbf{AX} = \mathbf{R} \quad (6.22)$$

式中, 各部分分别为

$$\mathbf{A} = 2 \begin{bmatrix} x_1 - x_n & y_1 - y_n \\ \vdots & \vdots \\ x_{n-1} - x_n & y_{n-1} - y_n \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + r_n^2 - r_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + r_n^2 - r_{n-1}^2 \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

可以获得未知节点的坐标估计值为  $\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{R}$ 。

基于 TOA 的定位算法简单、运算量少, 但是它要求未知节点与信标节点间具有良好的时间同步精度, 特别是当测距信号采用无线射频信号时, 由于传播速度为光速, 时间同步上的细微误差, 在距离上将会反映出很大的测距误差, 从而导致定位误差较大。目前, 对基于 TOA 定位算法应用最成熟的当属 GPS, 依靠昂贵、高精度原子钟实现时间同步, 但是由于无线传感器网络的节点在硬件尺寸、价格和功耗方面的限制, GPS 所采用的时间同步方法对于无线传感器网络而言几乎是不可行的。基于 TOA 的定位算法还应用于超声波定位系统, 由于与无线射频信号相比, 其声波频率低、速度慢, 因此对时间同步的要求不是很苛刻, 在超声波系统中能取得比较好的定位效果。

## 2. 基于 TDOA 的定位算法

基于 TDOA 的定位算法主要通过信标节点同时发送两种不同传播速度的信息, 未知

节点根据两种信号到达的时间差以及它们的传播速度来计算两个节点之间的距离。这两种信息的传播速度应该有显著性差异，如通常一个采用无线射频信号，一个采用超声波，如图 6-12 所示。假设未知节点与信标节点之间的距离为  $r$ ，无线射频信号和超声波的传播速度分别为  $v_1$  和  $v_2$ ，在时刻  $t_1$  发送无线射频信号，在时刻  $t_2$  发送超声波信号，未知节点分别在  $t_3$  和  $t_4$  时刻接收到无线射频信号和超声波信号。则未知节点与信标节点之间的距离为

$$r = [(t_4 - t_3) - (t_2 - t_1)] \frac{v_1 - v_2}{v_1 v_2} \quad (6.26)$$

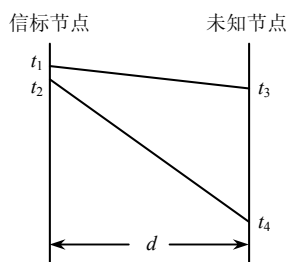


图 6-12 TDOA 测距原理

由于信标节点在发射射频信号和超声波信号的时候存在处理时间差，因此需要精确测量  $t_2 - t_1$  来补偿该时间差，以保证获得准确的距离。

基于 TDOA 定位机制，加州大学洛杉矶分校的 Andreas Savvides 等人设计了一套无线传感器节点实验平台，该平台配备了射程为 3m 的超声波收/发器和射频信号收/发器，并提出 AHLos (Ad-Hoc Localization System) 算法。该算法的具体过程是：信标节点利用超声波和无线射频发射器向其邻居节点广播自身的位置信息和发射时间，未知节点接收邻居信标节点的信号，并记录信号的到达时间和信标节点的位置信息；当未知节点接收的信标节点的数目大于或等于 3 个时，采用最大似然估计法计算自身的位置；当未知节点获得自身位置后，将其自身转化为信标节点，并向相邻节点广播其自身的位置信息，从而实现网络中未知节点的依此定位。

### 3. 基于 RSS 的定位算法

基于 RSS 的定位算法是通过射频信号在传播中的衰减来估计节点之间的距离，其主要依据是无线射频信号的大尺度传播模型。该模型认为基站通常采用理想的全向天线向外发射无线射频信号，无线射频信号在大气中传输的衰减程度与信号传播距离存在一定的函数关系，因此可以通过测量信号传输的衰减值从而间接得出传播距离。常用的信道模型有自由路径损耗模型、考虑墙壁影响的损耗模型和考虑多径效应的损耗模型，分别为

$$P(d) = P(d_0) + 10\alpha \lg d \quad (6.27)$$

$$P(d) = P(d_0) + 10\alpha \lg d + nW \cdot WAF \quad (6.28)$$

$$P(d) = P(d_0) + 10\alpha \lg d + \xi \quad (6.29)$$

式中,  $d$  表示接收机到发射机之间的距离;  $d_0$  为参考距离, 通常选取  $d_0 = 1\text{m}$  处的自由空间的路径损耗;  $\alpha$  为路径损耗因子;  $nW$  表示接收机与发射机之间墙壁的数目;  $WAF$  表示射频信号穿越墙壁带来的损耗;  $\xi$  表示零均值, 方差为  $\sigma^2$  的高斯随机变量, 可以用来描述多径效应。

未知节点通过测量周围信标节点的 RSS, 然后通过信道传输模型获得与周围信标节点的距离, 再基于三边定位或最大似然估计获得位置估计值。由于 RSS 的测量受到多径衰减和非视距阻挡的影响, 其强度具有时变特性, 为了降低周围环境噪声的影响, 提高定位精度, 许多研究集中在 RSS 信号滤波上, 如利用平均滤波消除大概率时域浮动噪声的影响; 利用投票滤波消除小概率大干扰噪声带来的影响; 也可综合利用最小二乘法和 Kalman 滤波器来降低信号传播过程中引入的线性噪声。

DV-Distance 定位方法是美国鲁特格斯大学提出的基于 RSS 无线传感器网络节点的定位方法, 该方法首先通过测量相邻节点间的 RSS, 获得不同邻居节点间点到点的距离; 然后利用距离矢量路由方法传播与信标节点的累计距离; 最后当未知节点获得与 3 个或更多信标节点的累计距离后, 使用三边定位方法获得未知节点的位置估计。该方法简单且易实施, 适合于节点均匀布署的密集网络中, 但是该方法并没有很好地解决 RSS 的预处理问题, 无法有效消除环境噪声的影响, 导致测距误差增大, 同时引起定位误差急剧增加。

#### 4. 基于 CSS 的定位算法

CSS 是一种应用于 WSN 定位的新型技术, 已经被 IEEE 802.15.4a 标准所采纳。CSS 技术不仅支持低的能量消耗还支持精确测距, 非常适合应用于无线传感器网络定位。与传统测距技术相比, 如基于到达角度 (Angle of Arrival, AOA)、RSS、TOA 和 TDOA, 基于 CSS 的测距采用对称双边双向测距技术 (Symmetric Double-Sided Two-Way Ranging, SDS-TWR) 来减少无线信号中时变信号的影响。同时 CSS 技术采用 2.4GHz 非授权频段, 提供 80MHz 和 20MHz 两种不同的信号带宽进行测距, 支持多种独立物理层网络, 能够与现有无线传感器网络技术融合, 具有良好的抗多径衰落能力。正是因为这些优点, 基于 CSS 的定位算法被广泛进行研究。

CSS 所采用的 SDS-TWR 的测距基本原理如图 6-13 所示。

为了实现未知节点 A 和信标节点 B 之间的测距, 节点 A 首先发送一个测距数据包给节点 B, 当节点 B 接收到来自节点 A 的测距数据包时, 立刻给节点 A 发送一个确认包, 节点 A 接收到节点 B 回送的确认包后, 就完成了第一次双向测距, 获得了从节点 A 到节

点 B 的传输延迟时间  $t_1$  和节点 B 的数据处理延迟时间  $t_2$ 。紧接着,节点 B 向节点 A 同样发送一个测距数据包,当节点 A 接收到这个测距数据包后,立刻返回一个确认包,从而完成第二次双向测距。最后节点 B 把第二次双边测距的结果传送给节点 A,从而节点 A 获得了从节点 B 到节点 A 的传输时延  $t_3$  和节点 A 的数据处理时延  $t_4$ 。利用  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  和  $t_4$ , 可以获得节点 M 到节点 N 的单向传输时间  $t$  为

$$t = \frac{(t_1 - t_2) + (t_3 - t_4)}{4} \quad (6.30)$$

可以看出,基于 SDS-TWR 技术的测距方法要求第一次和第二次双向测距都必须成功完成,这样通过双边测距的对称性,消除时钟漂移和节点时钟不同步所带来的误差,提高了测距精度。

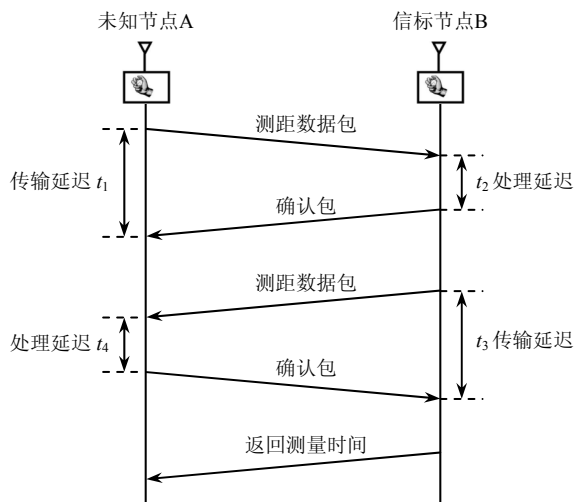


图 6-13 SDS-TWR 测距基本原理

然而,由于测量噪声的影响,特别是在复杂的室内环境下,由于墙壁和周围运动障碍物的影响,导致无线信号出现比较强的散射和反射现象,这些非直视信号使 CSS 测距在不同位置出现不同的测距偏差和测距浮动误差,严重降低了 CSS 定位算法的性能。为了解决上述问题,可采用滤波算法,如支持向量机 (Support Vector Machine, SVM)、粒子滤波 (Particle Filter, PF) 和卡尔曼滤波等,来检测、消除或补偿对非直视路径的影响。

### 6.3.3 距离无关的定位算法

距离无关的定位算法主要根据无线传感器网络的连通性、节点之间的跳数,以及已知位置的信标节点等信息来实现节点定位或位置估计。该种定位机制并不需要测量节点间的距离,通常较为简单和易实施,但是这样实现的定位精度也相对较低。典型的距离无关的定位算法主要有质心算法、DV-Hop 算法、APIT (Approximate Point-in-Triangulation

Test) 算法等。

### 1. 质心算法

质心算法是由南加州大学提出的一种基于网络连通性的、与距离无关的室外定位算法。其定位原理是：未知节点通过接收附近信标节点所发出的位置信息，并根据所接收到的信标节点位置信息求取这些信标节点质心，并将所求得的质心值作为未知节点的位置进行估计。

在实际无线传感器网络中，信标节点周期性地向邻居节点广播自身的位置消息，未知节点接收信标节点位置信息，当所接收到的信标节点数量超过设定的阈值时，未知节点通过对所接收到的信标节点位置信息求均值的方式实现对质心的估计，从而完成未知节点的定位。假设接收到的  $n$  个信标节点的位置坐标为： $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ，则未知节点位置  $(x, y)$  为

$$(x, y) = \left( \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} \right) \quad (6.31)$$

可见，该方法实现简单、通信次数少，但是仅能实现粗粒度定位，需要较高的信标节点密度，同时信标节点的部署位置对定位效果的影响还比较大。进一步对质心定位算法表达式分析可以知道，所有信标节点坐标信息对未知节点的影响都是相同的，即远近程度不同的信标节点坐标在求解未知节点坐标时的影响权重都是相同的，很明显这一估值方法从几何分布上考虑是不合理的。通常，未知节点与信标节点距离越近，说明其坐标更靠近该未知节点，该信标节点在质心定位算法表达式中应占有较大的权重。基于上面的分析，研究者提出了加权质心定位算法，即将不同信标节点的权重带入到未知节点求解算法中。目前权重的求取通常与信标节点和未知节点之间的距离直接相关，其距离值越大，权重值越小。同时考虑到接收信号强度与距离成反比，因此通常通过接收信号强度来反演出不同信标节点的权重值。

质心定位算法简单、易实施，并且具有很强的鲁棒性，不存在未知节点无法定位的情况。因此对于定位精度要求不苛刻，且对鲁棒性、低功耗等要求相对高的部分应用具有很好的适应性。

### 2. DV-Hop 算法

DV-Hop 算法是一种利用距离矢量路由和多跳累计距离的分布式节点定位算法，其主要思想是通过测量未知节点与信标节点之间的多跳累计距离和跳数，估算出每一跳的距离，从而确定每个节点的位置。DV-Hop 算法的具体实现主要分为如下三个阶段。

#### 1) 计算未知节点与信标节点之间的跳数

首先信标节点使用典型的距离矢量交换协议，向邻居节点广播信标消息，信标消息中包含标识符、位置信息和跳数值，初始跳数值为 0。接收到信标消息的相邻节点将记录



消息中包含的节点标识符,位置信息和跳数值,并将跳数值加1;然后再向自己的邻居节点广播,直到网络中所有节点都获得一个信标节点的位置和相互之间的最小跳数。

由于采用广播方式,信标消息可能多次到达一个节点,从而导致不必要的通信能耗和信息冗余,为了避免广播消息的无限循环,只有新的信标消息才被广播。如果一个节点接收到同一信标消息,并且信标消息中记录的跳数值大于或等于本地所记录的最小跳数,则该信标消息被视为无效信标消息。

### 2) 计算未知节点与信标节点之间的距离

当一个信标节点获得其他信标节点的跳数距离,就估计每一跳的平均距离,并且更新邻居节点的跳数信息,同时将其作为一个校正值广播至网络中。校正值是采用可控洪泛法在网络中传播,这意味着一个未知节点仅接收其获得的第一个校正值,而丢弃所有后来者,这个策略确保了绝大多数未知节点可从最近的信标节点处接收校正值,在大型网络中,可通过为数据包设置一个TTL域来减少通信量。未知节点在收到更新的每跳距离值后,就可以利用更新的每跳距离值和距离信标节点之间的跳数来估计自身与信标节点之间的距离。

### 3) 计算未知节点的位置

最后当未知节点获得3个或更多个信标节点之间的距离值时,未知节点采用三边测量或者最大似然估计的方法计算出节点的位置。

DV-Hop算法的实现相对简单、不需要进行节点间的测距,可以避免测距所带来的硬件开销和能量消耗,同时该算法只需要网络中存在较少的信标节点,通过多跳的方式获取未知节点与信标节点之间的距离,从而计算出未知节点的位置信息。但是其缺点是仅在节点部署密集、拓扑规则的网络中,其节点的平均跳距才能比较合理地反映节点之间的实际距离,获得较高的定位精度,而对于节点比较稀疏、拓扑不规则的网络,定位误差相对较大。

## 3. APIT 算法

APIT定位算法是另一种非测距定位算法,其基本原理是:无线传感器网络中的每个未知节点通过无线信号的信息获取其周围信标节点,记录下它能监听到的所有 $n$ 个信标节点的信息,在其中任意选择3个,然后采用三角形相似内点测试法,判断该未知节点是否处于以这3个信标节点为顶点所构成的三角形区域内。进行多轮这样的测试后,每轮测试选取不同的信标节点组合,直到穷尽所有的 $C_n^3$ 种组合或达到要求的精度,测试完成后得出包含此未知节点的所有三角形,求出这些三角形的重叠区域,最后计算出该重叠区域的质心坐标即为该未知节点的估计位置。

由以上的描述可以看出,APIT定位算法中的关键环节是测试待定位的未知节点是否包含在其周围信标节点所构成的三角形内,其实现方法有以下两种。

### 1) 最佳三角形内点测试法 (Prefect Point-in-Triangulation Test, PIT)

PIT 的基本原理是假如存在一个方向, 沿着这个方向的点  $S$  会同时远离或接近信标节点  $A$ 、 $B$  和  $C$ , 则判断点  $S$  位于  $\triangle ABC$  外; 否则, 则判断点  $S$  位于  $\triangle ABC$  内, 如图 6-14 所示。

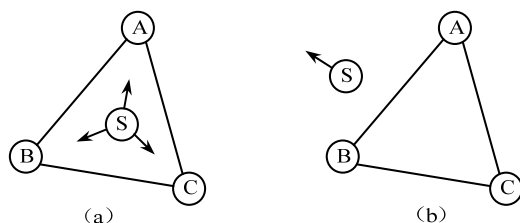


图 6-14 PIT 测试示意图

由上述例子可以看出, PIT 测试是依靠移动节点的位置来实现的。然而在无线传感器网络中, 节点通常是静止的, 因而无法通过移动节点来执行 PIT 测试; 同时穷尽所有可能的方向也是不可行的。针对这两个问题, 研究者提出了近似的三角形内点测试法 APIT。

### 2) 近似三角形内点测试法 (APIT)

APIT 的基本原理是如果点  $S$  没有邻居节点, 同时远离或靠近信标节点  $A$ 、 $B$  和  $C$ , 则判断点  $S$  在  $\triangle ABC$  外; 否则, 则判断在  $\triangle ABC$  内, 如图 6-15 所示。

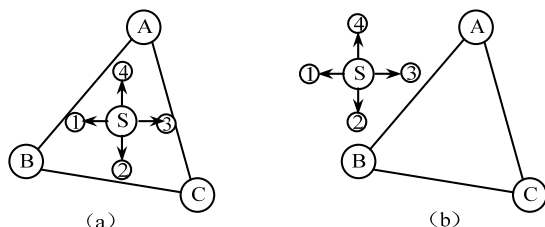


图 6-15 APIT 测试示意图

在图 6-15 (a) 中, 未知节点  $S$  的 4 个相邻节点 1、2、3、4 没有一个相对于未知节点  $S$  是同时远离或同时靠近信标节点的, 因此认定未知节点  $S$  处于三角形  $\triangle ABC$  的内部。在实际情况中, 未知节点  $S$  通过如下过程进行判断: ① 未知节点  $S$  通过与相邻节点 1 交换信息, 可知未知节点  $S$  接收到信标节点  $A$  和  $B$  的信号强度小于节点 1 接收到信标节点  $A$  和  $B$  的信号强度, 同时节点  $S$  接收到信标节点  $C$  的信号强度大于节点 1 接收到信标节点  $C$  的信号强度; ② 采用同样的方法依次判断未知节点  $S$  的相邻节点 2、3、4 是否同时远离或靠近信标节点  $A$ 、 $B$  和  $C$ , 从而最终确定节点  $S$  是否位于三角形  $\triangle ABC$  内。

在图 6-15 (b) 中, 未知节点  $S$  的相邻节点 1 会同时远离信标节点  $A$ 、 $B$  和  $C$ , 因此未知节点  $S$  判断自身位于三角形  $\triangle ABC$  外。

通过上面的分析可知, APIT 测试是通过判断周围各个方向上的邻居节点与信标节点

的相对距离关系来实现的。这个相对距离关系是利用无线射频信号的传播特性来获取的,即在一个指定的方向上,一个节点距离信标节点越远,其接收到信号能量衰减越大,强度越弱;反之一个节点距离信标节点越近,其接收到信号能量衰减越小,强度越强。

APIT 的定位过程分为如下四个步骤。

(1) 收集信息。网络中所有的信标节点通过无线射频信号广播自身的信息(包括位置坐标、标志号和发出的信号强度),而未知节点则收集邻近信标节点发来的信息,并记录接收到的信号强度(用于通过计算信号的衰减程度,估算自身与对应信标节点间的距离远近),邻居节点之间相互交换各自接收到的信标节点信息。

(2) APIT 测试。测试某未知节点是否位于邻近的不同信标节点组成的三角形区域内。

(3) 计算三角形重叠区域,即统计包含某未知节点的所有三角形,计算所有三角形的重叠区域。

(4) 计算重叠区域的质心坐标。计算出该重叠区域的质心坐标,并将其作为该未知节点的位置估计,从而完成对该未知节点的定位。

相对而言,APIT 是目前比较成熟的节点定位技术,其对网络中信标节点的密度要求较高,在信标节点密度不足的情况下,其定位过程中的 APIT 可能会出现错误,即三角形内的未知节点被判断为位于三角形外或位于三角形外部的未知节点被判断为位于三角形内部。其次,由 APIT 算法的定位过程可以发现,一个未知节点的定位需要足够数量的邻居信标节点。而实际的无线传感器网络节点的部署往往是不可控的,特别是军事应用,因此很难做到节点完全均匀分布,这就造成了有些未知节点(比如位于网络覆盖区域的边缘地带的未知节点)拥有的邻居信标节点较少(小于 3 个),导致它们不满足 APIT 的定位条件而无法完成定位。

## 6.4 管理控制技术

网络技术的发展历程已经证明,管理控制(简称管控)好一个网络通常比建立网络更为重要,并且也更为困难。作为一种新兴的网络——无线传感器网络具有能量资源、计算资源、存储资源等受限的独特性质,更是决定了不能对已有的管控技术进行简单复制,再加上无线传感器网络军事应用的特殊需求,更需要提出一些适应无线传感器网络自身特点和满足军事应用需求的管控技术。尽管在无线传感器网络研究初期,其研究重点更多集中在诸如 MAC 协议、路由协议、拓扑控制、时间同步、节点定位等领域,导致无线传感器网络管控技术在很长的一段时间内被忽视。但是随着无线传感器网络的研究和应用的深入,特别是军事应用所面临的目标环境复杂、节点随机部署及特殊监测需求等,使人们越来越发现管控技术对无线传感器网络的重要性。

### 6.4.1 管控技术的特点及分类

管控技术可以有效保证无线传感器网络具有较高的效率、更低的能量消耗、更佳的节点探测行为和更健壮的网络拓扑等，它是无线传感器网络走向军民应用的关键技术之一。但是由于其研究相对较少，再加上无线传感器网络其独特性质，使其管控技术研究面临一系列新的挑战。

(1) 无线传感器网络的资源极其有限，节点的能量、处理能力和存储能力等都比传统网络要低，通信带宽也较民用网络窄，特别是节点的能量资源，这就要求对无线传感器网络的管控尽量做到高效率 and 低功耗。

(2) 无线传感器网络的系统架构与应用环境密切相关，因此如何结合无线传感器网络应用环境，设计合理的管控框架和方法，更加合理地使用节点资源，优化网络，将会极大促进无线传感器网络走向实际应用。

(3) 异构化是无线传感器网络发展的一个新动向，即所谓的异构传感器网络——网络中的传感器节点在硬件资源和能量存储上不是完全平等的，存在能力较强和较弱节点，这就要求在管控设计中充分考虑节点的异构性，合理分配任务，从而使系统效率最大化。

根据上面的分析，在设计无线传感器网络的管控技术中，应当重点考虑以下要求。

(1) 能量高效。无线传感器网络管控技术必须是轻量级操作，按照一定管控策略对传感器探测行为和节点的状态进行管控，以降低能耗，延长网络生命周期。

(2) 健壮性和适应性。进行无线传感器网络管控应能够及时发现网络状态或节点状态（如网络拓扑变化、节点能量等），通过管控策略实现网络或节点的自我配置和自我修复，提高网络的健壮性和自适应性。

(3) 伸缩性。无线传感器网络管控策略或管控模型应具有一定的伸缩性，以适应不断更新管控方法和应用需求。

(4) 较好的控制功能。为了更好地维护网络，管理传感器节点，无线传感器网络管控方法应具有更好的、灵活的控制功能，以控制各节点上传感器的开关、对采样频率的设置、射频通信的开关等。

(5) 分布式。分布式管控技术不仅有助于无线传感器网络更好地实现网络能量均衡，还增加了其管控的可扩展性和灵活性。

到目前为止，针对无线传感器网络管控技术的分类包括如下三个方面。

#### 1. 按照管控的架构进行分类

按照管控技术实现的架构，可以分为集中式管控、分布式管控和层次式管控。其中，集中式管控是将汇聚节点作为管理者，收集所有节点信息并管控整个网络；分布式管控是认为网络中存在多个管理者，每个管理者控制一个子网，并与其他管理者协调通信以

完成管控功能；层次式管控是集中式管控与分布式管控的结合。

## 2. 按照采用的监测方式进行分类

根据采用的监测方式，可以分为被动式管控、反应式管控和先应式管控。其中，被动式管控采用被动式监测方式，只有在管理人员发送命令时，才收集或监测网络状态信息或节点信息，以收集数据供网络管控人员做事后分析；反应式管控是以监测预先设定的相关事件是否发生来自适应地对网络进行管控；先应式管控是主动监测、查询和分析网络状态，预测相关事件的发生并采取相应的管控动作，以维护网络性能。

## 3. 从构建和在使用层面上进行分类

根据管控技术的构建和使用层面，可以分为网络管控、节点能耗管控和探测行为管控三个层次。其中，网络管控主要从网络层面提供一套管控机制，有效地监测和控制传感器节点，以较少能耗对网络的资源、性能、故障、安全和通信等方面进行管控；节点能耗管控主要是对处理模块和通信模块的能耗控制；探测行为管控是基于单个节点的状态预测，进行节点功耗的动态调节，以降低节点能耗。

上述的前两种方法主要是结合传统网络管控方法而提出的分类，第三种方法是依据无线传感器网络自身架构和应用特点来划分的，从网络管控、节点能耗管控和探测行为管控三个层次对能耗进行管理与控制，以更加合理地使用节点资源和优化网络性能。因此，下面将从以上三个层次对无线传感器网络管控技术进行介绍。

### 6.4.2 网络管控技术

无线传感器网络管控技术是基于其自身网络规模大，节点资源能力受限，节点可靠性差，高动态性和以数据为中心等特点，从网络层面提供的一套管理机制。它可有效地监测和控制传感器节点，以较少能耗对网络的资源、性能、故障、安全和通信等进行统一管理与维护，从而降低网络能耗，提高传感器节点协作效率，增强网络的鲁棒性。

目前，实现网络管控的技术主要采用集中式、分布式和层次式三种框架。在集中式网络管控系统中，各传感器节点感知的数据经多跳后至管理节点或服务器进行处理，整个网络的管理由管理节点负责。这种结构易于实现，但由于所有传感器的数据都要求传送到中心处理节点，通信开销较大，不适合大规模的无线传感器网络。

分布式网络管控系统则拥有多个管理节点，每个管理节点管理一个子网，管理节点之间采用点对点通信，这种网络管控框架拥有较高的可靠性和效率，但较难实现和控制。

层次式网络管控框架结合了上述两种框架的优点，用簇来组织网络，每个簇选择一个簇头作为中间管理者，普通节点与簇头之间采用集中式的结构。这种管控框架可以有效组织大规模的传感器节点，且基于现有成熟的分簇算法易于实现，是目前研究最广泛

的网络管控框架。因此,本节重点介绍基于策略技术和移动代理技术的层次式网络管控技术,其管理任务的定义采用策略形式,运载与执行单元采用移动代理技术实现。这种策略技术的可伸缩性和灵活性可有效提高网络管控的自适应性,具有高度自治能力的移动代理能够实现网络管控的高效性和协同性,从而在网络层面降低网络能耗,延长网络生命周期。

### 1. 基于策略技术和移动代理技术的层次化网络管控模型

基于策略技术和移动代理技术的层次化网络管控的构建主要基于无线传感器网络的拓扑结构,不同的网络拓扑结构所采用的层次化网络管控结构不尽相同,本节介绍的网络管控结构主要基于两层分簇网络拓扑结构,如图 6-16 所示。

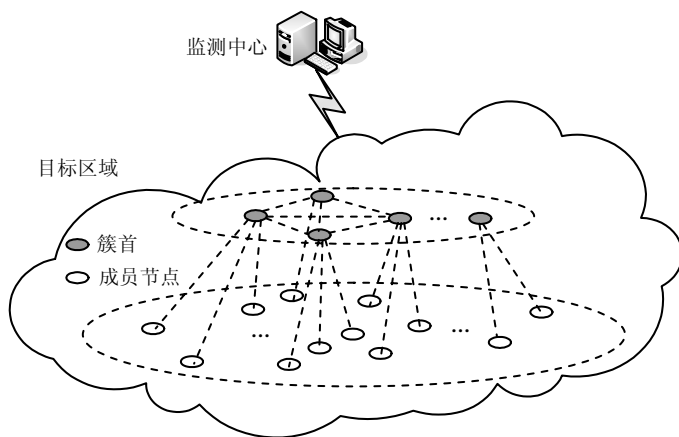


图 6-16 两层分簇网络拓扑结构

基于上述拓扑结构所设计的基于策略技术和移动代理技术的层次式网络管控模型如图 6-17 所示,该模型采用三层管控体系结构,即策略管理中心、簇策略 Agent 和成员 Agent。策略管理中心,通常情况下由拥有较强的存储和计算能力的汇聚节点承担;簇头节点作为区域管理者,主要承担策略代理功能,根据上层节点下达的管控策略指令,启动簇策略代理,结合本地策略库的策略指令,生产成员 Agent;成员 Agent 在簇内成员节点间进行活动,根据簇头发出的策略指令执行各种管控任务。

其中,策略管理中心主要根据网络管理者或用户提供的任务目标,完成策略的编辑、修改、发布以及将生产的命令行脚本、配置文件等派发到网络中的簇头节点。簇策略 Agent 基于策略管理中心下发的策略以及本地存储的策略,通过策略转换器、策略调度器将外来规则转化为适合当前节点的规则格式,利用代理生成器构造具有不同功能的移动成员 Agent,并制定相应的调度策略将成员 Agent 派发到簇内节点进行本地执行计算操作,完成相应的功能。成员 Agent 携带执行代码、运行状态、访问路径等信息在网络中自主迁移,在每个成员传感器节点上进行计算处理,与其他成员 Agent 协作地完成指定的任务。

成员 Agent 通过“按需移动”和“靠近数据源处理”来降低网络能耗和均衡网络能量，通过“异步交互”来实现各个成员 Agent 之间的协同，通过分布式协作提高处理效率。

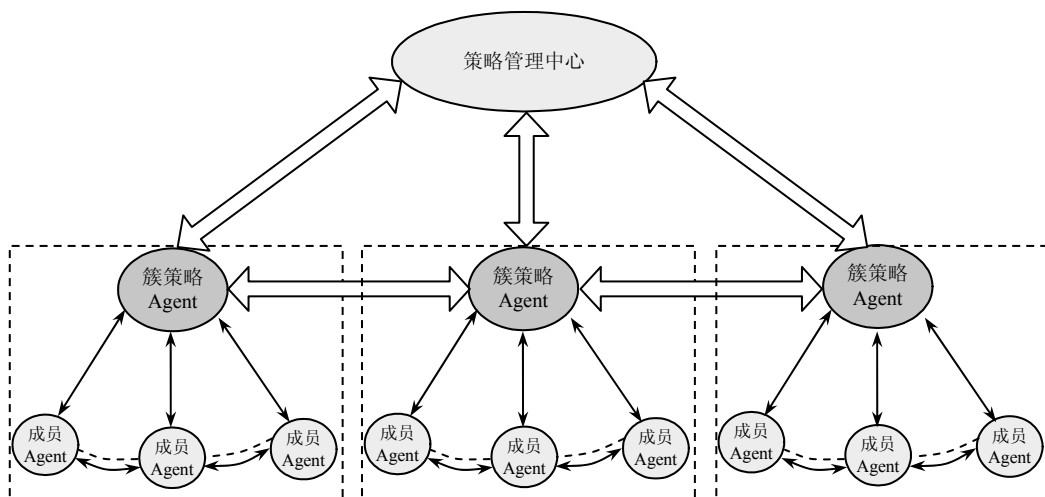


图 6-17 基于策略技术和移动代理技术的层次式网络管控模型

## 2. 调度机制设计

为了提高网络管控的效率和多个移动代理的协作性，需要重点分析移动代理的调度机制。

在传感网中，通常存在“一个部署多个应用的情况”，即在同一区域的传感器节点存在多种类型的应用，如传感网中常用的监控、事件检测和追踪三种类型的应用。其中，监控即是在一定条件下持续地监控某一参数（如温度、湿度）；事件检测即在监控前提下实时、快速地报告某一特定事件的发生（如非法入侵和火灾等）；追踪即是指对某一感兴趣的对象进行跟踪（如入侵目标）。

在这三种类型的应用中，监控一般采用每隔一段时间通过调度任务运行来实现；而事件检测和追踪都是在特定环境下通过触发任务事件进行特殊的处理来完成该功能。因此，不同类型的应用应具有不同类型的优先级，这就要求网络管控对移动代理具有良好的优先级调度机制。

考虑到无线传感器网络资源有限，并结合三种类型应用的需求，提出了一种易于实现且又能满足要求的事件级和任务级两级调度机制。所有移动代理构成一个“权值”队列，按照“权值”大小进行调度，其中事件级代理优先级高于任务级，同级间通过时间片轮转调度器来控制，并规定了每个移动代理最多可以运行  $n$  条指令。

为了实现上述调度机制，将移动代理的生命周期划分为创建态、移动态、静止态和结束态四个状态。其中处于“静止态”的移动代理又被划分为阻塞态、就绪态和运行态，移动代理状态切换图如图 6-18 所示。

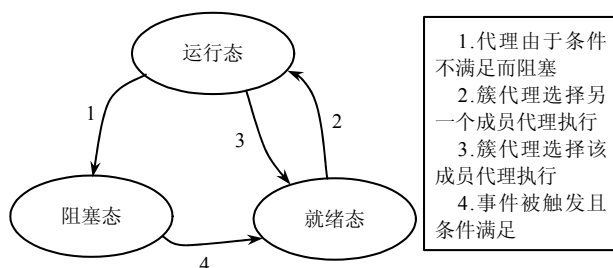


图 6-18 移动代理状态切换图

规定移动代理权值取值按照如下原则：处于阻塞态的移动代理的权值为 0；处于就绪态的移动代理权值与其上次被调用的时间和代理类型有关；事件级移动代理权值高于任务级移动代理权值；上次运行时间越早的移动代理权值高于运行时间越晚的移动代理权值。

### 6.4.3 节点能耗管控技术

传感器节点通常由处理模块、通信模块、传感器模块和能量供应模块四部分组成，其中前三部分消耗能量，并且由于传感器模块的能耗很低，传感器节点能耗的管控主要是考虑处理模块和通信模块的能耗管控。根据这些部件状态组合的有效性，将整个传感器节点分为多种状态（例如，活动状态和休眠状态等），可以在嵌入式操作系统的支持下，进行状态转换。而无线传感器网络的某些特点也使得这种转换成为可能，如监测事件的偶发性，使得传感器节点绝大部分时间处于空闲侦听状态，造成了极大的能量浪费，并且无线传感器网络覆盖冗余的特性也带来了能量浪费等诸多问题。因此，可以采用节点休眠调度方案使节点适时地进入休眠状态，以大幅度地降低网络的能量消耗。

当节点处于活动状态时，主要关注处理器和无线收/发器这两个主要耗能部件的节能方法。由于这两个部件的工作负载具有非静态性，部件在运行过程中不会一直处于峰值性能状态，这就为能耗的自适应管控提供了可能。对于处理器能耗，可以通过动态电源管理（Dynamic Power Management, DPM）和动态电压调节（Dynamic Voltage Scaling, DVS）两种策略予以优化。因此本节重点介绍 DPM 技术和 DVS 技术。

#### 1. DPM 技术

DPM 是一种有效的能够在降低系统功率消耗的同时而不影响系统性能算法。DPM 的基本原理是：当节点周围没有相关事件发生的时候，部分功能模块如果处于空闲状态，那么就关闭或使其处于低能耗的休眠状态，通过动态关闭无线收/发器或使其进入休眠状态，以管控节点能量消耗。

具体来讲，DPM 技术通过对节点系统资源的状态和负载进行实时分析，在满足系统性能约束的条件下，由功耗管理（Power Management, PM）单元发送命令来动态地调整系统资源的配置状态，达到降低系统整体能量消耗的目的，其具体过程如图 6-19 所示。



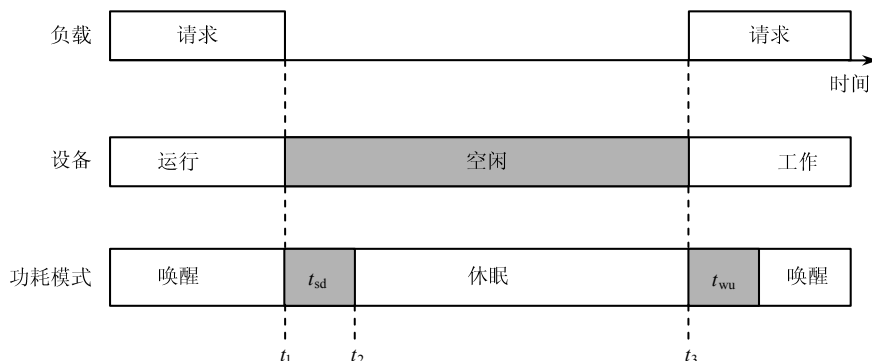


图 6-19 负载、设备、功耗模式关系图

可将工作负载看做多个任务请求的集合体，当有任务请求时，节点设备处于工作（Run）状态，反之处于空闲（Idle）状态。节点设备在  $[t_1, t_3]$  时间段内处于空闲状态，而在空闲状态时则有可能进入休眠模式。该设备在  $t_1$  时刻被关闭使其处于休眠状态，并在  $t_3$  时刻因接收到任务请求而被唤醒。在这一状态转换过程中需要额外的时间开销  $t_{sd}$  和  $t_{wu}$ ，它们分别代表休眠和唤醒所带来的延时；另外，状态转换还会消耗一定的能量。因此，在设计节点功耗管理策略时要恰到好处，只有部件进入低功耗状态时，节约的能量能够补偿状态转换所消耗的能量时，DPM 才能真正地节约能量。

对于无线传感器网络，传感器采集的信息形成任务队列并由处理器处理，之后由无线收/发器发送。采用 DPM 方法后，功耗管理策略会根据任务队列中的资源需求情况，动态调整节点资源分配及调度顺序，有选择性地让节点中耗电较多的处理器或无线收/发器等部件部分甚至全部进入休眠模式，只保留时钟频率低、耗电量小的功耗管理单元对所有任务队列的状态进行检测，并在适当的时候将处于休眠状态的部件唤醒，完成各种服务请求。在对节点处理器和无线收/发器的空闲时间进行考察时，可以结合实时调度理论，准确判定部件的空闲时间长度，以有效地优化节点能量消耗。

通过上面的分析可见，无线传感器网络采用 DPM 技术，可以在很大的程度上减少系统的能量消耗。但是该技术同样也存在一些缺陷，如其状态的转换同样需要消耗一定的能量，并且带有时延，如果状态转换策略没有恰到好处，不仅无法节能，反而会导致节点能耗的增加，还会影响节点的实时性能。同时在对节点级的休眠调度时，必须保证网络能以用户可接受的性能指标进行工作。

## 2. DVS 技术

DVS 技术是一种基于软件的电压调节方法，允许软件在处理器运行时动态地改变它的时钟频率和供电电压。其基本原理是：节点上的嵌入式操作系统通过实时监测处理器的利用率和任务队列的长度，并根据这两个参数的序列值计算当前与未来的工作量，以设定处理器工作频率，同时针对不同任务性能指标要求，分配不同的 CPU 电压等级，在

满足任务调度实时性的同时, 尽可能降低 CPU 工作电压和时钟频率, 从而减少 CPU 空闲时间, 降低系统能耗, 如图 6-20 所示。

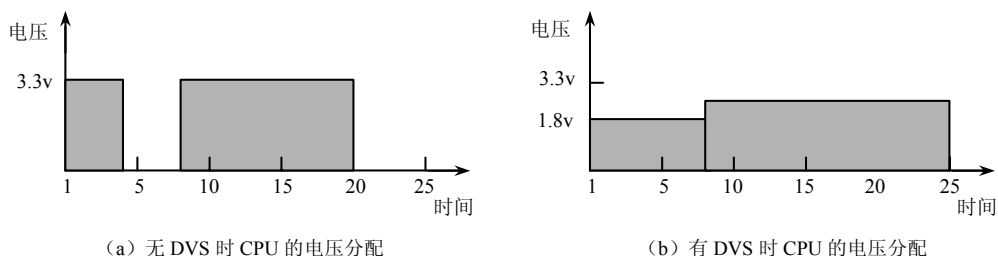


图 6-20 DVS 基本工作原理

可见, DVS 技术以延长任务运行时间为代价来达到减少能量消耗, 实现功耗与实时性之间的最优平衡。同时, 在实际无线传感器网络应用中, 由于用户对传感器节点的性能需求是不断动态改变的, 并不是总需要其以最大性能方式工作。因此, 如果能够精确地预测系统未来的性能需求, 计算出下个周期的处理速度, 并设置与该处理速度相对应的频率和电压, 就能够在不影响用户感知的情况下, 减少系统的能量消耗, 延长无线传感器网络的生命周期。

目前, 按照空闲时间分配粒度的不同可将 DVS 算法分为任务间 DVS 算法和任务内 DVS 算法两种。任务间 DVS 算法是以系统中单个任务为基本单元进行空闲时间分配的, 其优化对象是整个任务集, 通过分别控制任务集中每个任务的执行速度以进行功耗管理, CPU 电压和频率的调整只能发生在任务开始、结束或者抢占等上下文切换时刻。任务内 DVS 算法的研究对象是单个任务, 是将单个任务进一步细分, 在任务执行过程中根据任务的执行进度来动态调整其执行速度, 理论上比任务间 DVS 方法更节能。

总体而言, DVS 技术是一种硬件支持的软件低功耗方法, 需要硬件设备的支持, 只有在硬件设备允许系统去动态调压的情况下, 才能去使用这种技术; 而且, DVS 技术本身就是在系统不需要运行在这么高的系统频率的时候, 降低系统执行电压, 来达到系统节能的目的; 最后, 任何 DVS 算法都需要与其他技术 (如编译器或任务调度等) 结合起来, 才能进一步发挥其节能效果。DVS 技术也会带来一定问题, 带来降低处理器运行速度的副作用, 导致本来就十分有限的处理器资源, 变得更加的拮据; 并且对于有实时性要求的任务, 由于处理器运行速度的降低, 将无法保证任务实时性的实现。

#### 6.4.4 探测行为管控技术

DPM 和 DVS 能耗管理仅仅基于单个节点的状态来预测节点能耗的动态调节, 网络管控优化方法也仅基于单一的网络层进行能耗的优化。因此, 这些方法一方面不具有应用级的面向整个网络的设计视野, 无法做到对具体应用特点与需求的充分考虑; 另一方

面, 由于能量管理是无线传感器网络各层都要考虑的问题, 单独在节点硬件层、操作系统层或网络通信的某一个协议层设计能量管理机制, 并不一定能取得较好的整体节能效果。因此, 必须针对具体应用对能量管理进行跨层次、全网络级的优化, 而探测行为管控正是一种面向应用需求的能耗优化方法, 通过对传感器节点各个功能模块的有效调度与管控, 实现节点能耗的优化。

通常, 传感器节点的功能模块可以分为感知模块、数据处理模块、传输模块和电源模块四部分。其中, 感知模块执行探测行为; 传输模块执行信息传输功能, 包括对自身感知信息的传输, 及周围其他节点感知信息的转发传输; 处理模块承担所有信息的处理、存储及管理等功能。当节点周围没有相关事件发生的时候, 感知功能模块如果处于空闲状态, 那么就可以关闭或使其处于低能耗的休眠状态, 而传输模块可继续工作, 作为其他感知节点的中继节点, 接收并转发信息; 当与自身感知相关的事件发生时, 节点中的感知模块开始工作, 执行探测行为。可见, 通过各功能模块的有效调度, 可充分发挥节点自身的管控能力, 将各功能模块彼此联系又彼此独立的工作特点发挥到最佳, 从而确保在实现节点工作性能的同时, 降低其能量消耗。

基于感知、通信和处理等模块所处状态的不同组合, 可将传感器节点分为不同状态, 具体如下所述。

#### 1) 工作状态

工作状态指所有的模块都处于工作状态, 节点可以执行收集环境数据、无线收/发消息以及对数据的计算处理操作。

#### 2) 感知状态

感知状态指感知模块和处理模块处于工作状态, 而通信模块被关闭, 节点可以感知和处理周围环境中的信息, 但是不能进行数据传输。

#### 3) 通信状态

通信状态是指通信模块和处理模块处于工作状态, 而感知模块被关闭, 节点可以收发和处理数据, 但是不能收集环境数据。

#### 4) 睡眠状态

睡眠状态是指所有模块都被关闭, 但是节点可以通过定时器或其他方法激活各功能模块。

通常传输模块比感知模块和处理模块消耗更多能量, 因此对应四种工作状态其能耗也不尽相同。探测行为管控就是通过节点调度策略合理组织无线传感器网络中节点所处的状态, 让部分节点进入低能耗的感知、通信或睡眠状态, 从而降低整个网络的能量消耗, 以延长网络生命周期。一种典型探测行为管控状态转换模型如图 6-21 所示。

将传感器节点工作状态分为以下五种。

(1) 睡眠状态: 感知模块关闭, 通信模块关闭, 能量消耗最小;

- (2) 感知状态：感知模块开启，通信模块关闭，节点感知事件发生；
- (3) 侦听状态：感知模块开启，通信模块处于空闲状态；
- (4) 接收状态：感知模块开启，通信模块接收；
- (5) 发送状态：感知模块开启，通信模块发送。

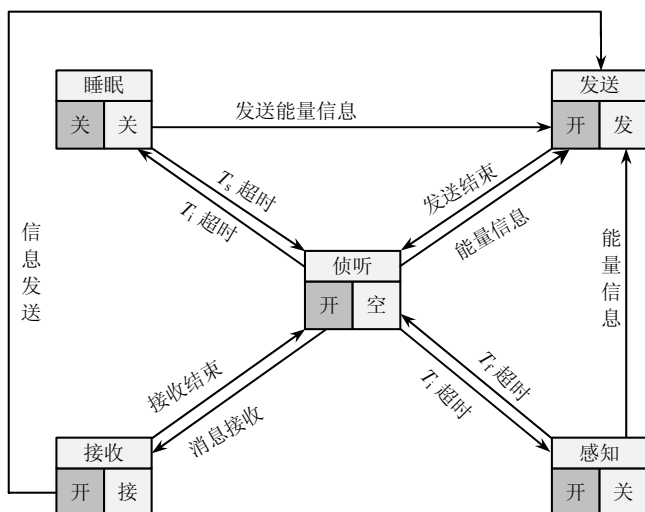


图 6-21 状态转换模型

节点之间的状态转换主要包含如下七种策略。

(1) 睡眠状态与侦听状态：处于睡眠状态的节点设置定时器  $T_s$ ，当定时器超时后，节点由睡眠状态进入侦听状态；处于侦听状态的节点设置定时器  $T_i$ ，此时节点的传输模块处于空闲状态，通过监听信道检查是否有数据发送给自己，当定时器超时后，节点由侦听状态以概率  $P_s$  进入睡眠状态。

(2) 感知状态与侦听状态：处于感知状态的节点设置定时器  $T_f$  感知事件发生，并将监测数据保存在本地存储器。当定时器超时后，节点由感知状态进入侦听状态；处于侦听状态的节点在定时器  $T_i$  超时后，以概率  $1-P_s$  进入感知状态。

(3) 侦听状态与接收状态：处于侦听状态的节点除感知事件外，其传输模块在定时器  $T_i$  超时前，如果监听到有信息发送给自己，节点进入接收状态；当接收完毕信息且不需要发送信息时，节点立刻由接收状态进入侦听状态，定时器重新计时。

(4) 侦听状态与发送状态：处于侦听状态的节点在定时器  $T_i$  超时前，如果处理模块计算出需要向邻居节点发送能量信息包，则节点由侦听状态进入发送状态。在发送能量信息包后，节点由发送状态进入侦听状态并设立定时器  $T_w$  监测确认消息的到来。如果  $T_w$  超时，仍然没有收到确认消息，节点再次进入发送状态，重新发送能量信息包，节点在重发  $k$  次能量信息包后停止发送，停留在侦听状态，定时器  $T_i$  重新计时。

(5) 睡眠状态与发送状态: 处于睡眠状态的节点在  $T_s$  时期内, 如果处理模块计算出需要向邻居节点发送能量信息包, 节点由睡眠状态进入发送状态。

(6) 感知状态与发送状态: 处于感知状态的节点在  $T_f$  时期内, 如果处理模块计算出需要向邻居节点发送能量信息包, 节点由感知状态进入发送状态。

(7) 接收状态与发送状态: 处于接收状态的节点在  $T_r$  时期内, 除感知事件发生外, 其传输模块实现对信息的接收。

可见, 探测行为管控的任务就是让每个节点决定何时转换状态以及转换到何种状态。探测行为管控的根本目标就是在满足应用所需性能的同时, 最大化降低无线传感器网络的能量消耗。不过, 探测行为管控本身也必然会引入计算开销和通信开销, 所以探测行为管控的设计需要对这些问题进行综合考虑, 合理优化节点中各工作模块的工作时间, 以延长网络生存周期。





## 第7章

# 无线传感器网络安全技术

安全技术一直以来都是网络技术的重要组成部分，没有足够安全保证的网络是没有应用前景的。作为一种起源于军事应用领域的新型网络——无线传感器网络，由于其多部署在非受控的复杂恶劣战场环境，易受到非法监听和各种恶意攻击，使得无线传感器网络的安全问题尤为突出。在无线传感器网络的军事应用中，提供安全、保密的通信是安全技术研究最为重要、最为基本的内容，以保证军事应用中数据采集、传输，甚至节点物理分布的安全和保密。但是，由于无线传感器网络具有不可靠无线信道广播特性、大规模多跳自组织特征、以数据为中心通信模式，以及节点资源极度受限等特点，使得传统的网络安全技术很难满足现有的无线传感器网络的应用要求。因此，在资源受限的应用环境下，开展无线传感器网络安全技术研究已经成为目前研究的热点和难点。



## 7.1 概述

目前来看,安全问题是制约无线传感器网络发展和应用的主要瓶颈。本节从安全需求与内容和安全面临的挑战两方面进行阐述。

### 7.1.1 安全需求与内容

无线传感器网络在空间上的开放性,使得攻击者很容易窃听、拦截、篡改和重播数据包;网络节点能量有限,也使得无线传感器网络易受到资源消耗型攻击;再加上传感器节点部署区域的特殊性,使得节点自身容易受到物理破坏或破解。可见,无线传感器网络的开放性、分布性以及无线广播特性都决定了它存在一系列安全需求,归纳起来主要包括信息安全需求和通信安全需求两类。

#### 1. 信息安全需求

信息安全需求包括如下四个方面。

(1) 数据机密性需求。数据机密性是指保证相关信息在存储和传输过程中的机密性,使其不被任何非授权用户或系统获得信息的真实内容。无线传感器网络数据机密性包括两个方面:第一要保证敏感感知信息无泄露,如在军事应用中,前线战场上部署的无线传感器网络所感知的信息通常具有高度机密性,因此必须得到保护;第二要保证敏感协议信息无泄露,如网络中密钥分配协议对于建立安全信道至关重要,因此节点间协商过程中的密钥信息也必须得到保护。

保护数据机密性通常采用的办法是加密、认证和密钥管理,其中只有授权用户才能知晓解密密钥是确保数据机密性的关键。

(2) 数据完整性需求。实现数据机密性并不等于说数据就是安全的。无线传感器网络会因为攻击者对数据恶意修改进入混乱状态,致使接收者无法获得正确数据。例如,恶意节点会在分组中添加一些数据片段或者直接篡改分组中的数据,然后将修改了的分组发送给原始接收节点。同时恶劣的通信环境也会导致数据在传输过程中出现数据丢失或者受损等现象,因此在通信中,需要对数据进行完整性鉴别,以确保数据在传输过程中没有发生任何变化。

(3) 数据真实性需求。很显然,仅仅防范数据包没有被篡改还是不够的,攻击者还可以在网络中插入伪造的数据包来影响或改变网络数据流,所以接收者需要确认每个数据包的真实性,即均有正确的来源。另外,在无线传感器网络拓扑构造、任务管理等过程中,簇头或基站需要通过广播或组播方式向成员节点发送指令,这些操作也需要实施认证,使接收者确认数据的真实来源。



(4) 数据新鲜性需求。数据新鲜性是要保证每次接收的数据都是发送方最新发送的数据,以杜绝接收重复的信息。对于由于无线传感器网络本身多跳机制和传输延迟所造成的数据包时效过时,并不是数据新鲜性要解决的主要问题,网络安全中的数据新鲜性主要目的是防止重放攻击,即攻击者窃听通信双方正常数据包,然后重新发送这些数据包以骗取传感器节点的信任。

## 2. 通信安全需求

通信安全需求包括如下三个方面。

(1) 节点安全保证需求。传感器节点构成了网络的基本单元,由于无线传感器网络节点数量规模大,有些应用场景可能是军事上的敌占区或无人值守区域,节点容易被俘获,因此节点本身应具有安全性,即节点不易被发现和节点不易被篡改。特别是在军事应用中,通常要求传感器节点在硬件上具备一定抗篡改性要求。

(2) 被动抵御入侵能力需求。无线传感器网络安全系统的基本要求是在网络局部发生入侵的情况下,保证网络的整体可用性。被动防御指的是当网络遭到入侵时,网络具备对抗外部攻击和内部攻击的能力。外部攻击主要指那些没有得到密钥,无法接入网络的节点,该类节点通过监听、干扰和分析网络通信活动,来为后续攻击收集信息。内部攻击是指那些得到相关密钥并以合法身份混入网络的攻击节点,该类节点可以通过注入虚假信息、重复发送数据等方式攻击网络。

(3) 主动反击入侵能力需求。主动反击入侵能力是指网络安全系统能主动限制入侵行为甚至隔离入侵者,为此需具备入侵检测能力和隔离入侵者能力。其中入侵检测能力是指需要能够准确识别网络中出现的各种入侵行为并发出警告,同时还需要确定入侵节点的身份或位置,为随后的隔离提供支撑。隔离入侵者能力是指需要网络根据入侵节点的身份或位置,在逻辑上对入侵节点进行隔离。

结合无线传感器网络安全需求可知,目前无线传感器网络安全研究的内容主要包括以下四个方面。

(1) 网络实体安全,包括保护物理条件、物理环境及网络硬件设施如传感器节点、汇聚节点以及附属设备等不受破坏。

(2) 网络软件安全,包括保护网络系统不被非法侵入,系统软件与应用软件不被复制、修改和控制以及病毒侵害等。

(3) 网络中的数据安全,包括保护网络的数据不被非法监听、篡改、伪造、阻断以及存取等,保护数据的原始性、完整性和一致性等。

(4) 网络安全管理,包括网络运行时建立的安全管理制度、入侵检测机制、网络安全判定策略及突发事件的安全处理方法等。

### 7.1.2 安全面临的挑战

与传统的分布式系统不同,无线传感器网络的资源受限,节点内无法存储全网的拓扑结构信息,且拓扑结构与网络资源不断变化,这些特点都给安全技术研究带来了很多新的挑战。

#### 1) 能量限制

通常,传感器节点在部署后很难替换或再充电,为了延长网络生命周期,要尽量降低由于安全机制所带来的计算和通信能耗,所以低能耗是设计安全算法时首要考虑的因素。

#### 2) 计算和存储能力受限

传感器节点计算和存储资源的有限性导致传统网络中很多成熟、有效和复杂的安全协议和算法在此不能直接使用。

#### 3) 通信带宽受限

为了降低能量消耗,传感器节点一般采用低速率低功耗的无线通信技术,因而使无线通信带宽变窄而且经常变化;再加上恶劣环境的影响,传感器节点间的通信质量更加不稳定,从而导致安全机制很难实现。

#### 4) 通信的不可靠性

无线信道通信的不稳定、节点并发通信的冲突和多跳路由的较大延迟使得在进行安全算法设计时必须考虑容错问题,以合理协调节点通信,并尽可能减少对时间同步的要求。

#### 5) 节点的物理安全无法保证

传感器网络有时部署在敌占区,因而很容易遭受物理上的破坏和俘获。由于传感器节点低成本的要求,通常不配置抗篡改硬件设施,因此一旦节点被俘获,其中的安全信息(如密钥)将完全泄露。所以在设计安全机制时,必须考虑如何检测、识别和隔离被俘节点问题,同时还要考虑部分节点被俘后产生的安全信息泄漏问题,以及系统仍然能够继续保证整个网络功能可用等问题。

#### 6) 网络整体安全性和节点多重功能特性

传统网络一般只需要保证端到端的安全特性,而无线传感器网络是作为一个整体来完成某个任务的。另外,每个节点在完成监测任务同时,还要负责转发邻居节点的数据,因此在设计无线传感器网络安全协议时,需要考虑网络整体的安全性要求以及节点的多重功能特性。

#### 7) 安全需求与应用相关

无线传感器网络所面临的攻击形式多种多样,由于无线传感器网络本身的局限性,要同时防御所有攻击是不可能的。在制定安全机制时只能根据不同应用的安全需求侧重防御某些攻击。例如,侧重于数据私密性的应用,防御数据被窃取攻击是安全设计的核心;侧重于数据真实性的应用,安全设计主要关心的是如何防御虚假数据注入攻击和数

据破坏攻击。

总而言之,无线传感器网络有其自身特点,正是因为这些特点和约束,才增加了安全技术设计的复杂性,导致无线传感器网络安全实现面临诸多挑战。

## 7.2 安全威胁分析

由于无线传感器网络部署区域的开放性、无线通信广播性以及网络自组织性等特点,导致无线传感器网络面临着多种类型的安全威胁,但是目前对无线传感器网络安全威胁的分类还没有一个权威的说法,本节从无线传感器网络分层方面对安全威胁进行分类,以帮助安全设计人员全面理解无线传感器网络所受到的安全威胁,为设计更为高效的安全防御策略提供支撑。

### 7.2.1 物理层安全威胁

物理层协议负责频率选择、载波频率产生、信号检测、调制和数据加密等。由于无线传感器网络使用无线电媒介进行信息传输,所以经常受到干扰攻击;同时无线传感器网络中的节点往往被部署在不安全的地区,节点物理安全得不到保障。因此,无线传感器网络在物理层容易遭受干扰攻击和物理破坏两类攻击。

#### 1) 干扰攻击

干扰攻击就是攻击节点在无线传感器网络工作频段上不断发送无用信号,以干扰网络中节点所使用的无线电频率,使其无法正常工作。该类攻击只要获得或检测到网络通信频段的中心频率,就可以通过在该频点附近发射无线电波进行干扰。可见,干扰攻击对单频点无线通信网络非常有效。同时,根据攻击节点破坏力和数目,该类攻击既可以干扰网络中的一个小区域,也可能影响整个网络。

针对干扰攻击,典型的防御方法是各种扩频通信方式如跳频扩频和编码扩频等。其中,跳频扩频根据发送者和接收者都知道的伪随机序列,快速地在多个频率中进行切换,攻击者由于不知道跳频的规律,所以无法一直干扰通信;编码扩频方式复杂度较高,而且能量开销比较大,因此限制了它在无线传感器网络中的应用。

#### 2) 物理破坏

由于传感器节点部署“区域”的开放性,特别是在军事应用中,敌方人员很可能俘获一些传感器节点,对其进行物理上的分析和修改,并利用它干扰网络正常功能。

常见的物理破坏攻击包括直接停止服务和篡改攻击。其中,直接停止服务是指直接将其破坏掉或者拿掉该传感器节点的电池,使该传感器节点失效,退出网络,如果受到攻击的是网络骨干节点,将会直接威胁网络的可用性;篡改攻击是指通过对节点硬件和软件的分析,获得传感器节点存储的机密信息,如身份 ID、会话密钥、相关网络协议工

作原理等信息,使得攻击者可以克隆伪造和篡改合法节点的功能,从而制作出具有合法身份的恶意节点,最大限度地扰乱网络功能。

针对无法避免的物理破坏攻击,需要无线传感器网络采用更加精细的控制保护机制,建立完善的物理损害感知机制,使传感器节点可以根据其收/发数据包情况、外部环境的变化和一些敏感信号的变化,来判断是否遭受物理侵犯。一旦感知到其受到物理侵犯,就采用应对策略,使敌对目标不能正确分析系统的安全机制,从而保护剩余传感器节点免受安全威胁。其次,也可以采用防篡改的硬件设计,但这种方法通常会增加节点成本。最后,还可以使用数字签名与其他机制相配合的方法,以识别这些合法的恶意节点所发送的报文。

### 7.2.2 链路层安全威胁

链路层主要负责管理数据的多路复用、数据帧的探测、介质存取和纠错控制,用于保证网络中点对点、单点对多点的可靠连接,提供无线传感器网络自组织能力,并提供传感器节点公平有效分配通信资源的能力。目前,针对链路层的攻击主要包括有意冲突、节点资源耗尽攻击、信道不公平竞争及女巫攻击。

#### 1) 有意冲突

恶意节点可以在节点数据包传输过程中发送数据,引起冲突。任何数据包,只要有一个字节的数据在传输过程中发生了冲突,那么整个包就会被丢弃。因此,攻击者通常故意地引起某些重要包的冲突,比如确认控制包。这样的冲突结果,将导致某些介质访问控制协议性能指数急剧下降。

目前,针对有意冲突,可以采用纠错编码、监听重传机制等进行防御。其中,纠错编码主要是解决低冲突条件下的数据纠错问题,其算法复杂度与数据信息的冗余度相关,因此其纠错位数不能过大。不过,如果攻击者采用瞬间攻击的方式影响数据包个别数据位出现错误,则纠错编码能够取得比较好的效果。监听重传机制是当接收方没有接收到正确数据包时,通过监听信道是否空闲来进行数据的重传,以保证接收方能够获得正确的数据包。

#### 2) 节点资源耗尽攻击

节点资源耗尽攻击就是利用协议漏洞,通过重复冲突使传感器节点不断重传数据,从而耗尽传感器节点的能量。

针对节点资源耗尽攻击,其中一种应对方法是数据流速控制,通过流速控制来限制节点重发数据的速度,这样当遭受资源耗尽攻击时,节点可以尽可能地保存自己的能量,但是这样会降低网络效率;另外一种方法是在协议实现时,制定执行策略,对过度频繁的请求不予理睬,或对同一数据包的重传次数进行限制,避免恶意节点无休止的干扰导

致的节点能量耗尽。

### 3) 信道不公平竞争

信道不公平性竞争是指恶意节点或者被俘节点通过不断发送优先级高的无用报文来占据信道,从而使其他正常节点在通信中处于劣势,无法占用信道。可以说,信道不公平竞争是一种弱的拒绝服务(DoS)攻击,它需要敌方完全了解无线传感器网络中具体的MAC协议机制,并利用MAC协议进行干扰攻击。

针对信道不公平竞争,一种应对方法是采用短包策略,即在MAC层中只使用较短的数据包,这样就可以缩短数据包占用信道的时间;另外一种方法就是弱化优先级之间的差异或者不采用优先级策略,而采用竞争或者时分复用方法传输数据。

### 4) 女巫攻击

无线传感器网络中,女巫攻击者可以捏造出很多的身份对网络进行攻击。很多无线传感器网络MAC协议支持通过投票方式,从一系列可能的通信链路中选择最佳的传输链路。女巫攻击可以使用填满投票箱的办法,决定任何的投票结果。因此在基于传输路径的数据融合过程中,女巫攻击可以引起数据融合结果的错误。

针对女巫攻击,可以采用无线电资源测试方法进行对抗,该方法具体是指传感器节点为它的每一个邻居节点分配一个信道广播测试信息,然后传感器节点通过监听测试信息和信道找出非法节点,消除女巫攻击。

## 7.2.3 网络层安全威胁

网络层负责数据路由的确定,能量高效是网络层路由设计的首要目标。目前,针对网络层的攻击主要有伪造路由信息、选择性转发、黑洞攻击、虫洞攻击和汇聚节点攻击几种。

### 1) 伪造路由信息

破坏路由协议最直接的方法是针对路由信息本身进行攻击,攻击者可以伪造路由信息来破坏网络中数据的转发。伪造路由信息可以通过篡改路由信息、欺骗路由信息和重发路由信息来创建路由环,吸收或拒绝信息流通量,延长或者缩短路由路径,形成虚拟的错误路由信息。

其中,篡改路由信息和欺骗路由信息可以通过对路由信息加签名来防御;重发路由信息可以通过在消息中加计数值或时间戳来防御。

### 2) 选择性转发

恶意节点作为网络的一部分,可以被当做正常的路由节点使用。在恶意节点冒充数据转发节点的过程中,可以对接收到的报文选择一部分正常转发,剩下的随即丢弃,从而破坏网络的正常通信。这种攻击的隐蔽性很强,一般很难发现。

针对选择性转发攻击,可以采用多路冗余路由方式来应对,这样即使恶意节点丢弃数据包,数据包也可以从其他路径传送到目的节点,这也迫使攻击者需要俘获更多的节点去继续实施攻击。多路冗余路由方式虽然增强了数据传送的可靠性,但是会降低能量的高效性。

### 3) 黑洞攻击

基于距离向量的路由机制通过路径长短进行路径选择,这样的策略容易被恶意节点利用。恶意节点通过广播零距离公告,吸引周围节点选择它作为路由路径上的点,让周围节点将所有的数据包都发送到恶意节点,从而导致在网络中形成了一个路由黑洞。

针对黑洞攻击,可以采用通信认证、多路径路由等方法来抵御,以减少黑洞攻击所带来的关键数据丢失。

### 4) 虫洞攻击

虫洞攻击是无线传感器网络安全中的一个严重威胁,它不需要俘获网络中的任何传感器节点,并且它可以在网络初始化阶段执行。具体攻击过程如下:当节点 A 广播路由请求包时,攻击者收到请求包并且向它的邻居节点重放,每一个收到请求包的受害节点将认为它们在节点 A 的广播范围内,并且把它作为自己的父节点。因此,即使受害节点距离 A 节点几跳,攻击者也使得它们相信节点 A 距离它们只有一跳,因此形成虫洞,导致路由路径选择错误。

针对虫洞攻击,可以在网络初始化阶段通过检查双向连接来防御虫洞攻击。同时,基于地理位置的路由机制也可以有效地防御虫洞攻击,因为每个节点知道距离 A 节点大概有几跳的距离。

### 5) 汇聚节点攻击

基站节点、汇聚节点或者簇头节点在网络中承担比普通节点更大的责任。攻击者可能利用路由信息判断出这类节点的地理位置或者逻辑位置进行攻击,由此给网络带来较大的威胁。

针对汇聚节点的攻击,一种方法是提高对地理信息传输的加密强度,做到对位置信息的重点保护;另一种方法是弱化网络节点的异构性,增加重要节点的冗余度,这样即使关键节点被破坏也可以用选举机制和网络重组方式进行网络重构。

## 7.2.4 传输层安全威胁

传输层主要用于建立无线传感器网络与 Internet 或其他外部网络的端到端连接,由于传感器节点能力的限制,节点无法维持端到端连接的大量信息,而且节点发送应答消息会消耗大量的能量,因此目前关于无线传感器网络传输层协议的安全性研究比较少。另外,汇聚节点通常是无线传感器网络与外部网络的接口,其传输层一般采用已嵌入式构

建的传统网络协议，并对传统协议进行了适当的精简和优化。目前整体来看，传输层安全威胁主要有泛洪攻击和异步攻击两种。

### 1) 泛洪攻击

对于需要维持连接两端节点状态的协议，泛洪攻击可以用来耗尽那些节点的内存空间。攻击者重复地发送新的连接请求，直到被请求节点的资源耗尽或连接数到达最大值，从而阻塞其他节点的合法连接请求。

针对泛洪攻击，可采用客户端谜题技术，该技术思路是在建立新的连接前，服务节点要求客户节点解决一个谜题，而合法节点解决谜题的代价远远小于恶意节点的解题代价。

### 2) 异步攻击

异步攻击是指攻击者破坏目前已经建立的连接。一个攻击者可以反复地向接收节点发送欺骗信息，使得接收节点要求发送节点重传丢失的帧，如果时间标记准确，攻击者可以降低甚至完全破坏接收节点交换数据的能力。

针对异步攻击，可采用的手段是要求在交换数据包时进行双方节点的身份确认，将检测到的恶意数据包丢弃。但由于无线传感器网络中节点的物理安全得不到保障，所以节点使用的身份确认机制也可能被攻击者知道，从而无法判断数据的真假。

总而言之，无线传感器网络面临的安全威胁涉及各个方面，需要系统地从下而上地提出解决方案。下面将针对上述安全威胁重点介绍典型的安全技术以及其发展情况。

## 7.3 典型安全技术分析

安全技术是无线传感器网络走向应用，特别是军事应用的关键技术之一，针对无线传感器网络所面临的安全威胁，目前重点研究的安全技术包括安全框架、加密技术、密钥管理、安全服务和入侵检测技术等。

### 7.3.1 安全框架

无线传感器网络基本的安全需求是保护数据的机密性、完整性、真实性和新鲜性，同时保障系统的可用性。满足基本安全目标的安全协议集合构成了无线传感器网络的安全框架，形成无线传感器网络的整体安全框架是构建安全防御机制的重要手段。目前，典型的无线传感器网络安全框架有 SPINS、TinySec 和 Lisp 等，本节重点介绍研究最广泛的 SPINS 安全框架。

SPINS 安全协议族是最早的无线传感器网络安全框架，包含了 SNEP(Secure Network Encryption Protocol) 和 uTESLA(micro Timed Efficient Streaming Loss-tolerant Authentication Protocol) 两个协议。SNEP 协议提供点到点的通信认证，实现数据的机密性、完整性和新鲜性等安全服务，uTESLA 协议则实现了单点到多点的广播消息认证。

## 1. SNEP 协议

SNEP 协议是为无线传感器网络量身打造的一种低通信开销的安全网络加密协议。该协议采用基站和节点之间共享主密钥的安全引导方式,即假设每个节点都与基站之间共享一对主密钥,其他密钥都是从此密钥衍生出来的。通过信任基站,SNEP 协议提供了数据机密性、数据认证、完整性保护和新鲜性认证等安全机制。

SNEP 协议采用计数器模式实现数据的机密性,即通信双方共享一个计数器,计数器的值作为每次通信加密的初始向量,每次通信时计数器值不同,相同的明文加密后必定产生不同的密文,其表达式为

$$E = \{D\}(\text{Kenc}, C) \quad (7.1)$$

式中,  $E$  表示加密后的密文;  $D$  表示加密前的明文;  $\text{Kenc}$  表示加密密钥;  $C$  表示计数器,其值作为加密时的初始向量。

SNEP 协议通过消息认证协议实现数据完整性,其认证公式为

$$M = \text{MAC}(\text{Kmac}, C \parallel E) \quad (7.2)$$

式中,  $\text{Kmac}$  表示消息认证算法的密钥,  $C \parallel E$  为计数器值  $C$  与密文  $E$  的连接,表明消息认证码是对计数器与密文一起进行运算的。SNEP 协议中的消息认证是采用密文认证的方式,该方式在收到数据包后可以马上对密文进行认证,而不像明文认证那样需要先解密数据包再进行认证,因此可以加快接收节点认证数据包的速度。

SNEP 协议通过计数器模式实现了数据弱新鲜性,保证了双方通信节点知道消息是连续从接收节点或发送节点发送出来的。

假设节点 A 给节点 B 连续发送 10 个请求数据包,通过计数器的值( $C_1, \dots, C_{10}$ ),节点 B 能够知道这 10 个请求数据包是顺序从 A 发送出来的。然后节点 B 将相应消息回复给 A, A 根据计数器的值( $C_1^*, \dots, C_{10}^*$ )可以判断消息回复是从 B 顺序发送出来的,并且对重放攻击能有效抑制,从而实现弱新鲜性认证。但是这个新鲜性认证存在一个问题,即节点 A 不能判断它所收到的消息回复包是针对它发出哪个请求包的回应。如果 A 收到的回复消息不是按照其请求包发送顺序给出的,那么它将不能为每个请求回送正确的响应。为此, SNEP 协议定义了强新鲜性认证方法,此认证方法会增加安全通信开销和计算开销,在要求不高的任务应用中,可以考虑不使用该认证。

## 2. uTESLA 协议

uTESLA 协议是为低功耗设备专门打造的实现广播认证的流认证协议,其主要思想是先广播一个通过密钥  $\text{Kmac}$  认证的数据包,然后公布密钥为  $\text{Kmac}$ 。这样就保证了在密钥  $\text{Kmac}$  公布之前,没有人能够得到认证密钥的任何信息,也就没有办法在广播包认证之前伪造出正确的广播数据包。



uTESLA 协议的运行过程包括基站安全初始化、网络节点加入安全体系和节点完成数据包的广播认证三个过程。

### 1) 基站安全初始化

基站一旦在目标区域内开始工作, 首先进行初始化, 进行密钥池的生成, 并确定密钥同步时钟。密钥池的生成过程是: 首先基站随机选择密钥  $K_n$  作为密钥链中的第一个密钥; 然后重复运用单向散列函数  $F$  不断产生其他密钥, 即

$$K_i = F(K_{i+1}) \quad 0 \leq i \leq n-1 \quad (7.3)$$

在密匙使用过程中, 需要关联两个时间变量, 即同步时间间隔  $T$  和密钥发布延迟时间间隔  $d \times T$ , 其中同步间隔表示一个广播密钥的生存期, 在一个同步周期  $[i \times T, (i+1) \times T]$  内, 基站发送的广播包使用相同的密钥  $K_i$ ; 密钥发布延迟被定义为同步周期的一个整数倍, 并且要求至少大于基站和最远节点之间的一次包交换时间, 以保证最远节点收到一个广播数据包的时候, 该数据包的认证密钥还没有公布出来。

### 2) 网络节点加入安全体系

基站完成安全初始化后, 就开始接受节点的加入。每个节点通过 SNEP 协议与基站之间进行同步。假设节点 A 在  $[i \times T, (i+1) \times T]$  时间段内向基站 S 要求加入网络, 则其加入的具体过程描述为

$$\begin{aligned} A \rightarrow S: (N \parallel R_A) \\ S \rightarrow A: (T_s \parallel K_i \parallel T_i \parallel T \parallel d) \quad \text{MAC}(K_{AS}, N \parallel T_s \parallel K_i \parallel T_i \parallel T \parallel d) \end{aligned} \quad (7.4)$$

式中,  $N$  是一个用于强新鲜性认证的随机数;  $R_A$  是请求加入网络的数据包;  $T_s$  是当前时间;  $K_i$  是初始化密钥;  $T_i$  是当前同步间隔的起始时间;  $T$  是同步间隔;  $d$  是密钥发布的延迟时间, 是同步间隔的倍数;  $K_{AS}$  是节点 A 与基站 S 之间的认证密钥。

经过此轮认证过程, 节点将获得关于认证广播的所有信息。但还存在两个问题: 第一,  $A \rightarrow S$  的过程没有认证, 所以比较容易受到 DoS 攻击; 第二, 整个过程没有加密, 从一般的安全角度上看, 广播内容并不需要保密, 因此这样会让攻击者掌握更多的广播认证信息, 更容易让攻击者找到漏洞攻击网络。是否对节点加入过程进行加密, 需要结合实际应用选择。

### 3) 节点完成数据包的广播认证

节点的加入过程可以穿插在整个网络运行的任何时段, 而广播认证的过程在基站初始化完成以后才可以进行, 广播认证的过程如图 7-1 所示, 其中密钥公布延迟为两个时间单位。

图 7-1 给出了基站连续 5 个密钥周期发送广播包 P1~P8 的公布密钥  $K_{i-1} \sim K_{i+3}$  的过程。节点在收到广播包 P1 和 P2 的时候, 通过时间同步条件判断它们使用的广播认证密钥  $K_i$  还没有公布出来, 此时节点会将这两个数据包保存起来。节点拥有基站的密钥公布

时间表, 因此它会在基站公布该密钥的时候查收这个密钥。收到密钥  $K_i$  后, 节点首先计算  $F(K_i)$ , 然后比较  $F(K_i)$  是否与  $K_{i-1}$  相同。如果相同,  $K_i$  就是合法密钥, 否则丢弃该密钥。收到合法的密钥  $K_i$  后, 节点将根据时间标尺, 自动使用  $K_i$  来认证在  $[T_i, T_i + T]$  时间段内接收到的广播包 P1 和 P2。

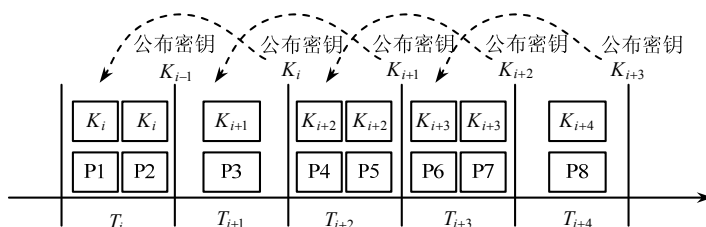


图 7-1 广播认证过程

虽然对 SPINS 协议各个方面的研究都有了一些进展, 但还存在很多理论上和实际实施过程需要研究的如下问题。

(1) SPINS 协议虽然定义了无线传感器网络安全通信所需要的绝大部分内容, 但没有考虑 DoS 攻击的可能性;

(2) SPINS 协议使用预共享密钥对形式的安全引导协议, 导致其过分依赖基站;

(3) SPINS 协议没有考虑通信密钥更新问题, 要实现密钥的前向安全性, 必须要有切实可行的密钥更新机制;

(4) 随机密钥安全引导模型存在不完全连通的问题, 并且为了保证安全引导过程添加了额外的处理, 使得协议实现起来比较复杂。如何针对不同的应用需求设计出合适的安全引导协议是一个重要的研究问题。

### 7.3.2 加密技术

加密技术是所有网络安全机制实现的前提, 针对安全需求中的机密性要求, 应确保网络节点间传输的重要信息是以加密方式进行, 使得只有合法的通信实体(密钥拥有者)方可得到正确信息, 其他实体均无法得到该信息。在无线传感器网络中, 由于具有无中心网络基础设施、节点能量有限、存储能力和计算能力较弱以及动态的拓扑结构等特点, 使得现有传统的密码算法难以直接应用, 寻找和设计符合无线传感器网络特点的低能耗加密算法是无线传感器网络安全技术研究必须解决的问题。

通常, 加密技术可分为对称密码技术和非对称密码技术两大类。其中, 对称密码是指加密和解密时使用相同的密钥, 所使用的加密算法通常比较简单和高效, 更加适合资源受限的无线传感器网络, 但是传输和保管密钥是一个十分严峻的问题; 非对称密码技术是指加密和解密使用不同的密钥, 该技术实现需要公开密钥和私有密钥两个密钥。其

最大特点是密钥无须在网络中传输,并且无明确的加密和解密密钥的概念,用公开密钥加密的数据需要用对应的私有密钥解密,如果用私有密钥加密则需要用对应的公开密钥解密。下面选取典型的可应用于无线传感器网络的对称密码技术和非对称密码技术进行详细介绍和分析。

### 1. 对称密码技术

在无线传感器网络中,对称密码技术用来给数据加密,以保证数据的机密性。鉴于无线传感器网络的特点,在选择对称密码算法时不仅要考虑密码算法的安全性,还需要重点考虑加/解密的能耗、存储和计算能力需求,以及通信开销等因素。目前,可应用于无线传感器网络的典型对称密码技术有 DES(Data Encryption Standard)算法和 RC5 算法。

#### 1) DES 算法

DES 算法是由 IBM 公司在 1970 年左右开发出来的,1977 年被美国选为国家标准,其密钥长度为 56 位,是密码学上应用最广、影响最大的分组加密算法之一,是一种典型的对称密码体制。其加密的基本过程如下所述。

(1) 初始置换。给定 64 位明文分组,通过初始置换将输出结果分为左右各 32 位,其主要目的是更容易将明文和密文数据以字节大小放入 DES 芯片中。初值置换表如表 7-1 所示,它表明了其置换规则,即输入的第 1 位放到输出的第 58 位,输入的第 2 位放到输出的第 50 位,依此类推,最终完成 64 位的置换。其中输出的前 32 位作为左 32 位( $L_0$ ),输出的后 32 位作为右 32 位( $R_0$ )。

表 7-1 初值置换表

58	50	42	34	26	18	10	2
60	52	44	36	28	20	12	4
62	54	46	38	30	22	14	6
64	56	48	40	32	24	16	8
57	49	41	33	25	17	9	1
59	51	43	35	27	19	11	3
61	53	45	37	29	21	13	5
63	55	47	39	31	23	15	7

(2) 子密钥生成。DES 的密钥长度为 64 位,其中有 8 位是奇偶校验位,因此有效位数为 56 位。将这 56 位密钥通过 DES 算法固有的密钥算法,以获得 16 个 48 位子密钥,用  $k_1, k_2, \dots, k_{16}$  表示,分别供 16 次迭代算法使用。

(3) 轮变换。利用 16 个 48 位子密钥和 DES 算法中的轮函数进行 16 轮的迭代,以快速实现数据流的混淆和扩散,得到  $L_1$  和  $R_1$  两个 32 位密文数据流。

(4) 逆初始置换。为了保持加解密结构的一致性,需要对两个 32 位密文数据流  $L_1$  和  $R_1$  进行逆初始置换,输出一个 64 位密文分组。

DES 算法具有很高的安全性,但是自公布以来,人们就怀疑其密钥太短,难于抵抗穷尽密钥搜索攻击,特别难于应对各种暴力破解方法。

## 2) RC5 算法

RC5 算法是 1994 年提出的一种对称分组加密算法,其特点是:① RC5 算法只使用在微处理器上常见的初等计算操作中,使其易于在硬件和软件中实现;② RC5 算法的基本操作每次对数据的整个字进行,所以是一种快速的加密算法;③ 一个字中的比特数是 RC5 算法中的一个参数,这使得该算法对不同字长的处理器有很强的适应性;④ 循环次数和密钥长度是 RC5 算法的可变参数,因此可以用来在计算能耗和更高安全性之间做出折中选择;⑤ RC5 算法还具有结构简单易于实现和内存要求低的特点。可见,RC5 加密算法比较适合无线传感器网络应用,下面对 RC5 算法进行简单介绍。

(1) RC5 算法参数:RC5 是一种可变参数的密码算法,它由三个参数确定一组加密算法,一般表示为 RC5- $w/r/b$ 。其中参数  $w$  定义为分组长度的比特数,其允许选取的值为 16、32 和 64;参数  $r$  表示加密和解密算法循环的轮数,取值为 0,1,⋯,255;参数  $b$  定义为密钥的长度,取值为 0,1,⋯,255。例如,RC5-32/6/8 表示,加密的分组为  $2w$ ,即明文和密文分组为  $64b$ ;加密和解密算法包含 6 轮循环;密钥长度为 8B 和  $64b$ 。因此可以根据无线传感器网络应用目的和安全性能要求选择不同的定制参数。

(2) 密钥扩展:RC5 算法使用加、异或和循环三个基本计算操作:来实现密钥扩展,利用密钥扩展函数对密钥进行一系列操作,以产生  $N$  个子密钥用于加密和解密。其中密钥扩展函数具有一定的单向性,以保证其安全性。

(3) 加密运算:RC5 用两个  $w$  位的寄存器 A 和 B 存放输入的明文和输出的密文。将明文分成两个  $w$  位的两个部分存储在 A、B 中以实现加密算法。

(4) 解密:由于是对称加密,解密是加密算法的逆过程,因此可以从加密算法中导出解密过程。

RC5 的两个最显著的特征是算法的简单性和数据的循环移位,其中循环移位是算法中仅有的非线性部分,正是这种非线性运算使得对该算法的线性分析和差分分析都很困难,由此保证了其具有比较好的安全性。

## 2. 非对称密码技术

与对称密钥体制相比,非对称密钥体制具有密钥分发管理容易、安全强度高等特点。但因其算法在运算过程中需要处理的数据量太大,加/解密速度需要很长时间,速度较慢。所以主要用于身份认证和数字签名。但是,近来一些研究表明,非对称密码算法经过优化后也能应用于无线传感器网络领域。因此,许多研究者尝试在资源有限的无线传感器节点上实现非对称密码算法,典型应用代表有 RSA 算法和基于椭圆曲线的加密算法。

### 1) RSA 算法

RSA 算法是一种被广泛使用的非对称密码技术, 具有加密密钥和解密密钥两个相关但是不同的密钥。在传统的计算机网络中, RSA 算法可以提供身份认证和密钥交换; 在嵌入式系统中, RSA 算法通过使用安全协处理器应用于智能卡的身份认证。RSA 算法具体实现可以分为密钥产生过程和加解密过程。

其中, 产生密钥的过程包括:

- (1) 系统产生两个大素数  $p$  和  $q$ , 这两个大素数等长但是不相等;
- (2) 计算  $n = p \times q$ , 以及欧拉函数  $\varphi(n) = (p-1)(q-1)$ ;
- (3) 随机选择整数  $e$ , 使得  $0 < e < \varphi(n)$  且  $\gcd(e, \varphi(n)) = 1$ , 其中整数  $e$  为公钥,  $(e, n)$  是加密密钥;
- (4) 计算私钥  $d$ ,  $d = e^{-1}(\bmod \varphi(n))$ ,  $(d, n)$  为解密密钥。

RSA 加解密过程分为两步, 首先将明文分组并数字化, 每个数字化分组明文的长度不大于  $\log n$ , 然后对每个明文分组依次进行加/解密运算。其中加密运算是使用公钥  $e$  和要加密的明文  $m$  进行  $c = m^e(\bmod n)$  运算, 即可获得密文; 解密运算是使用私钥  $d$  和要解密的密文  $c$  进行  $m = c^d(\bmod n)$  运算, 即可获得明文。

RSA 算法虽然安全可靠, 但是其运算量巨大, 需要处理器具有较强的运算能力、较大的存储器空间以及持续稳定的电源能量。无线传感器网络节点的运算能力较弱、节点能量有限且存储空间较小, 通常很难直接使用 RSA 算法, 必须对 RSA 算法中的多次循环运算进行优化和改进, 目前研究者提出采用蒙哥马利算法来对 RSA 算法进行改进, 使其能够应用在无线传感器网络节点上。

### 2) 基于椭圆曲线的加密算法

椭圆曲线加密 (Elliptic Curve Crypto, ECC) 算法由于其密钥分解难度大和占有资源少等优点, 已成为非对称密码技术体制中新的研究和应用重点。实际上, 目前已经有很多应用 ECC 算法加密的应用实例, 比如智能 IC 卡、硬件加密狗、PKI 认证体系中的登录认证等。

在椭圆曲线加密算法中, 利用定义在有限素数域上的椭圆曲线, 其方程如下

$$y^2 = x^3 + ax + b \quad (7.5)$$

式中,  $p$  为大素数,  $a$  和  $b$  为两个小于  $p$  的非负整数, 在有限素数域若它们满足

$$4a^3 + 27b^2 \neq 0 \quad (7.6)$$

则有满足式 (7.5) 的点  $(x, y)$  和一个无穷远点  $O$  组成了椭圆曲线  $E$ 。

椭圆曲线离散对数问题定义为: 在给定椭圆曲线  $E$  的条件下, 选取椭圆上的一个点  $P$ , 在给定整数的情况下, 进行如下的点积运算

$$Q = kP = P \otimes P \cdots \otimes P \quad (7.7)$$

可以证明,在已知  $k$  和  $P$  时,计算  $Q$  比较容易,而由  $Q$  和  $P$  计算  $k$  则比较困难,到现在还没有有效的方法解决该问题,这就是椭圆曲线加密算法原理之所在。通常将点  $P$  称为基点,  $k$  称为私有密钥,  $Q$  称为公有密钥。

相对于 RSA 算法, ECC 算法计算量更小,所需存储空间更少,同时密钥生成方便,因此比较适合低带宽、节点能力有限的无线传感器网络。并且, ECC 算法到目前为止还没有发现明显的漏洞,使人们充分相信其安全性;同时随着 ECC 算法的不断改进,在实现效率上取得了长足的进步,已成为已知的效率最高的非对称密码技术之一。

### 7.3.3 密钥管理

密码系统包含密码体制和密钥管理两个基本要素。其中密码体制规定了明文与密文之间的变换方法;密钥管理是指将密钥分发到网络中各个节点的过程,以及在必要情况下提供密钥更新和删除等功能。它通常包括系统初始化,创建、分发和安装密钥,密钥使用、更新、撤销和销毁等部分。根据近代密码学观点,密码系统的安全取决于密钥的安全,因此,密钥管理是系统所有安全服务的基础。

对于无线传感器网络而言,密钥管理是其安全中最重要、最基础的问题之一,有效的密钥管理是其他安全机制(如机密性、认证性、完整性、可用性、安全路由和安全定位等)的基础。无线传感器网络密钥管理需要解决以下四个方面的问题。

(1) 抗俘获攻击的安全弹性问题。传感器节点容易被俘获,从而使其密钥被解析,因此要求密钥管理具有良好的安全弹性,使整个无线传感器网络不会因为部分节点被俘获而使其安全性大幅下降。

(2) 轻量级问题。传感器节点在能源、计算能力、存储能力和通信带宽等方面存在较强的约束,这就要求实现轻量级的密钥管理,同时避免集中控制带来的通信拥塞和能源的过多消耗。

(3) 分布式网内处理问题。基于基站的信任模型将不可避免导致通信信道的拥塞和能源的过多消耗,同时增大网络遭受单点失效引起的风险,因此需要分布式密钥管理方案。

(4) 网络安全可扩展问题。由于能量耗尽、功能失效以及遭受到攻击等情况的发生,使得有必要补充新的传感器节点,这就要求网络安全具有可扩展性,使新节点与现有节点之间快速地建立共享密钥。

结合上述问题,对目前主流的密钥管理方法进行梳理与总结。

#### 1. 简单密钥分配协议

简单密钥分配协议主要包括单密钥全网共享协议、密钥成对建立协议和集中式密钥分配协议。其中,单密钥全网共享协议是最为简单的密钥管理协议之一,其网内所有节点都保存同一个密钥用于数据的加/解密,因此内存需求较低;同时由于不用执行共享密

钥发现算法, 所以其通信负载也较低。但是该协议应用于无线传感器网络有一个致命的缺点, 那就是攻击者只需要捕获一个网内节点, 就可以控制整个网络。

在密钥成对建立协议中, 每个节点都与其他的所有节点建立不同的共享密钥, 因此在所有节点间提供了点对点的认证。但是它对节点的存储要求较高, 与网内节点规模的平方成正比, 是大规模无线传感器网络中传感器节点所无法满足的。

集中式密钥分配协议使用可信服务器为全网任何两个节点之间临时分配会话密钥, 每个节点只需保存自己的身份密钥。该协议对节点的存储需求低, 抗捕获性好, 但是由于要求可信服务器能够与网内所有节点直接通信, 所以不适合大型无线传感器网络, 可扩展性差。

## 2. 密钥预分配协议

密钥预分配协议主要包括预安装模型、确定预分配模型和随机预分配模型。其中, 预安装模型无须进行密钥协商, 网络中所有节点预安装相同密钥, 该模型安全弹性差, 攻击者俘获任一节点中的主密钥就等于俘获整个网络; 确定预分配模型通常是基于数学方法, 在安全门限内可提供无条件安全, 有效地抵御节点被俘获。

随机预分配模型是基于随机图连通原理, 其基本思想是建立一个较大容量的密钥池; 在节点被部署到监控区域前, 每个节点从密钥池中随机选取少量密钥构成密钥链; 如果在两个节点各自的密钥链中存在相同的密钥, 则该密钥可作为这两个节点安全通信的共享密钥; 如果两个节点各自的密钥链中不存在相同的密钥, 则需要通过中继节点建立一条安全通信路径。

可见, 随机预分配模型可有效缓解节点存储空间限制问题, 网络的安全弹性也较好, 但是节点间共享密钥的发现通常比较复杂, 同时还存在安全连通问题。这是因为密钥池越大, 安全性越好, 但密钥链存储需求就会增加, 否则两个节点间能找到共享密钥的可能性会变小, 导致安全通信的连通性降低。而确定预分配模型的缺点是计算开销大, 且当被俘获节点数超过安全门限时, 整个网络被攻破的概率急剧增加。密钥随机预分配方案可通过增加共享密钥的发现难度和相应的通信开销来降低被攻破的概率。

通过上面分析可知, 随机预分配模型和确定预分配模型各有侧重, 如何根据具体的应用环境选取一个安全、有效、实用的密钥管理是实现无线传感器网络的关键。

## 3. 动态密钥管理协议

网络中的节点在完成密钥协商之后, 根据节点之间的通信密钥在网络生命周期内是否变化的情况可将密钥管理归纳为静态密钥管理协议和动态密钥管理协议两种。在动态密钥管理协议中, 当网络中的某些节点被俘获导致网络中的密钥信息泄露时, 可以通过规定算法更新密钥, 使用新密钥通信同时删除原密钥。与静态密钥管理协议相比, 其主

要优点在于：① 可以动态取消被捕获节点所拥有的全部密钥，使网络不受被捕获节点的独立攻击；动态性能好，适合于使用寿命长、拓扑结构变化频繁的网络；② 可扩展性强，适合于大范围，冗余布置的网络。下面介绍一种经典的基于 EBS (Exclusion Basis System) 无线传感器网络动态密钥管理方法。

EBS 是 2004 年提出的基于组合原理的组通信密钥管理方法，在基于 EBS 的无线传感器网络动态密钥管理方法中包含管理密钥和会话密钥两种密钥。其中，管理密钥又被称为密钥生成密钥，它组成了 EBS 密钥体系，管理密钥并不直接用于通信数据的加密，而主要用于 EBS 内部的密钥管理事件，包括密钥系统的建立和更新，生成会话密钥，驱逐节点等；会话密钥又被称为通信密钥，当 EBS 系统建立以后，会在线生成会话密钥，用于组内或给某些特殊节点之间的通信数据加密。

其基本原理是：定义 EBS 为一个以用户子集为元素而构成的特殊集合，如在  $EBS(n, k, m)$  中， $n$  表示节点数目， $k$  表示分配给每个节点的密钥个数， $k + m$  表示密钥总数，可以证明：

(1) 当  $C_{k+m}^m \geq n$  时， $C_{k+m}^m$  中的任意  $n$  个组合方式均可构成  $EBS(n, k, m)$ ，进而形成一个密钥分配方案。

(2) 可以通过广播最多  $m$  个数据包实现动态取消、并更新任意一个节点所拥有的全部密钥，从而驱逐该节点。

可见，如果发现有节点被捕获，EBS 管理方法支持在全网范围内进行密钥更新，以驱逐该节点。但是 EBS 管理方法的缺点是，如果攻击者捕获了网内部分节点，将会发现整个密钥空间，从而影响其安全性。

### 7.3.4 安全服务

无线传感器网络中存在许多基础服务，如时间同步、节点定位和数据融合等，安全服务就是针对这些基础服务实现的安全时间同步、安全节点定位和安全数据融合等，下面分别介绍。

#### 1. 安全时间同步

在军事应用中，由于时间同步机制的重要性，经常会有恶意攻击者对时间同步机制进行攻击。然而，目前大部分时间同步协议在设计时都假定网络环境绝对安全，因此很容易受到攻击。例如，在 TPSN 协议中，节点间首先建立层次关系，每个节点与自己的上一级节点交换同步信息。因此，当攻击者破坏同步层次结构，成为网络中大部分节点的上级节点时，它发送的错误时间信息将影响所有这些下级节点。在 FTSP 协议中，攻击者可能冒充基站，在网络中广播时间同步报文，导致网络中节点都同步到一个错误的时间。

时间同步错误直接影响应用层，使数据融合出现错误。除此之外，时间同步受到攻



击后还可能造成网络的节点自定位、拓扑管理等关键机制不能正常工作。因此,在军事侦察等比较敏感的应用中,网络应该采用安全的时间同步机制。

目前已经有多种具有安全防御能力的时间同步机制,如安全组同步机制,该机制在组成员间采用单播方式交换同步报文,邻居节点间的同步报文利用共享密钥进行加密认证,从而防止外部攻击节点发送错误信息来破坏网络同步。但是由于无线传感器网络中节点一般都分布得比较密集,每个节点存在多个邻居节点,因此邻居节点间的通信将给网络引入较大的通信和计算开销。另外,研究者还提出 TinySeRSync 安全时间同步机制,节点不再采用单播方式转发同步报文,而是采用本地广播方式,并利用 uTESLA 协议保证广播信息的安全分发,为了满足 uTESLA 协议关于网络中节点保持松散同步的要求, TinySeRSync 机制在全网同步前首先进行邻居节点间的单跳同步,该机制的实现同样也给网络带来较大的计算和通信开销。可见,如何在保证安全性的前提下尽可能减少计算和通信耗费是安全时间同步机制设计需要解决的一个重要问题。

## 2. 安全节点定位

现有的节点定位算法大多假设无线传感器网络运行在友好的环境中,研究存在攻击的情况下的节点定位算法较少。当网络节点处于恶劣的环境中,或者在军事应用领域,用于定位的信标节点被俘或失效,将降低节点的定位精度,甚至使节点不能定位。可见,影响无线传感器网络定位效果的因素大致可分为两类:其一为节点失效(如电量耗尽)、测距误差、环境毁坏(通信干扰)等引起节点定位误差增大;其二为恶意攻击,攻击者通过内部攻击和外部攻击两种方式蓄意增大节点的定位误差或者使节点定位失效。安全节点定位主要针对恶意攻击进行研究。

安全定位算法的目的在于最大限度地将攻击效果最小化或剔除攻击节点。针对各种攻击所依赖的机制不同,安全定位算法所采取的安全策略不尽相同,依据安全定位算法的设计思想可将现有的安全节点定位算法大致划分为两种类型:检测攻击节点,寻找最大可信参考节点集合;容忍攻击节点,以最小化攻击效果。

### 1) 检测攻击节点,寻找最大可信参考节点集合

第一种安全节点定位算法根据系统所采用的定位方法和受到的攻击类型,选用有效的定位方法和机制,剔除攻击节点,寻找最大的可信参考节点集合,利用该参考集合作为计算坐标的依据。在检测攻击节点的过程中,一般依据距离限定(Distance Bounding)、距离改变量相同(Simultaneous Distance Modification, SDM)、统计量的稳定性等性质及投票估计(Voting-based Estimation)等方法检测攻击节点。

基于上述检测方法,研究者设计了 Beacon Suite 安全节点定位算法,该算法中使用已知位置信息的节点充当检测节点,该节点向被检测节点发送定位请求,被检测节点回复检测节点自己的坐标,检测节点利用得到的被检测节点坐标值和自身坐标值计算与被检

测节点的距离,同时由接收信号的强度测量两点间的距离。通过比较测量距离和计算距离是否一致判断被检测节点的可信度。该算法的性能受信标节点的分布状况影响较大,适合于信标节点分布均匀的网络环境。研究者还应用均方误差作为衡量定位参数集合稳定性的判别指标,在无攻击的情况下,计算节点的定位均方误差,并将该值作为判决门限,然后找出最大的稳定定位参数的集合,实现安全节点定位。部分研究者引用假设检验找出恶意节点,通过验证在同样间隔所接收到的信号强度差是否服从正态分布来检验是否存在攻击,利用检验两个恶意节点是否服从同样的分布,找出攻击是否来自同一个源头。

## 2) 容忍攻击节点,以最小化攻击效果

第二种安全节点定位算法允许恶意节点的存在,利用具有鲁棒性的统计算法或健壮的定位机制,建立免疫力强的定位算法,使得恶意节点对系统的攻击效果达到最小。现有的安全算法中,通常通过改变发射机的发射功率或定向天线的方向来缩小信标节点通信范围相交的区域,从而使未知节点遭受攻击的几率减小;或者,在定位算法中引入约束条件,减小被攻击的可能性;或使用多种定位机制(Hybrid System)共存的方法提高网络的抗攻击能力。

例如,给信标节点配备定向天线,在天线的每个扇区,信标节点发送自己的坐标位置和天线的边界,未知节点通过收集所有能接收到的信标节点的坐标和界限,计算重叠区域,并以重叠区域的质心作为坐标。该算法只可以防止虫洞攻击和女巫攻击。另外一种安全机制是使信标节点发送不同功率的信号,未知节点被动地接收功率信号,不同大小的功率信号所形成的网格将未知节点所在的区域分割,未知节点接收并记录各个信标节点的功率水平,通过增加功率水平数量来减小被攻击的可能性,但该机制的能量和通信消耗较大。

## 3. 安全数据融合

通常数据融合协议都是使用特定的数据汇聚节点对数据进行融合。一旦该汇聚节点被攻击者捕获,攻击者将很容易向网内注入虚假数据。即便攻击者没有捕获汇聚节点,也可以捕获普通传感器节点,然后向汇聚节点发送虚假报文,从而破坏数据融合后的正确性。因此需要在数据融合过程中考虑如何保证数据的机密性、完整性和可认证性,并通过节点之间的协作来识别被捕获节点。目前,做好无线传感器网络安全数据融合,最大的挑战是如何在传感器节点资源受限的前提下同时能满足安全方面的需求。

近年来,研究者针对无线传感器网络安全数据的融合进行了大量研究,也取得了许多进展,下面结合机密性和完整性两个安全目标对经典的安全数据融合协议进行分析。

### 1) 基于机密性的安全数据融合

数据融合的机密性主要是用于保证数据在传输过程中能够安全到达汇聚节点,确保

攻击者无法窃听到传输过程中的敏感信息,一般情况下是通过对数据加密来进行传输,加密主要依赖于对称加密和非对称加密等加密体制,但是密码学领域的一般加密体制并不适用于资源受限的无线传感器网络中,因此需要根据无线传感器网络的特点来设计相对应的方案。

目前,研究者针对机密性的安全数据融合研究提出了模式码、同态加密、数据分割技术等加密体制。其中,在基于模式码的安全数据融合中,模式码用来分类和标识原始数据,每个原始数据都对应一个模式码,在数据的传输过程中,传感器节点并不是将感应的原始数据直接传输,而是根据模式码生成算法,将每个原始数据生成对应的模式码,然后将模式码传递给簇头,簇头收到模式码之后进行分类,通知具有相同模式码中的一个节点来传递原始数据。在该算法中同时使用了加密机制,簇头可以直接对密文进行融合操作,并不需要解密工作,因此减少了传统加解密操作带来的安全隐患,并且由于只选择了一个节点传输原始数据,节省了节点能量的开销。

同态加密机制的基本原理是在进行数据融合的过程中,中间融合节点不需要对数据进行解密操作,而是在密文上直接进行运算,并把密文运算结果传输给汇聚节点再进行解密,通过这个过程得到的结果跟直接对明文进行运算的结果一样,可以说同态加密是一种端到端的加密方式,典型的算法有 CDA (Concealed Data Aggregation) 算法和 ECEG (Elliptic Curvel ElGamal) 算法等。同态加密算法增强了数据的保密性,并缓解了数据融合节点的压力。但同态加密算法也有许多不足:① 目前存在的大多数同态加密算法所进行的数据融合操作比较单一,只能够运用于加法运算,如求均值和方差等;② 同态加密算法不能有效地对数据完整性进行鉴别;③ 同态加密算法增加了网络的传输开销;④ 同态加密算法所提供的安全性较弱,还有待进一步提高。

数据分割机制是对数据进行先分割再组合的方式来保护无线传感器节点的隐私数据。典型的方法包括基于分簇的隐私保护数据融合算法,其基本思想是:首先进行簇的形成,利用节点之间逐层发送“HELLO”信息与“JOIN”形成数据簇;然后,簇内各节点将采集的数据和非保密的种子数进行多项式运算,并将运算结果加密后在节点之间进行交互传递;最后,各节点对收到的信息进行聚合运算,并将结果传递给簇首节点,由簇首节点执行最后的融合计算。该方法的特点是簇中成员的数量越大则抵制节点之间相互合谋的能力越强,但同时簇首节点进行数据融合的计算开销和通信开销也越大。

## 2) 基于完整性的安全数据融合

无线传感器网络在进行数据融合的时候,攻击者也有可能通过篡改、伪造或丢失数据的方式对融合结果进行攻击,使得基站或其他节点接收错误的信息进而影响用户的决策,因此对数据融合结果的完整性鉴别至关重要。

目前,针对完整性的安全数据融合,研究者提出了基于延迟的完整性鉴别方案、基

于 Hash 树的完整性鉴别方案及基于监督和信誉机制的完整性鉴别方案三种。其中, 基于延迟的完整性鉴别方案主要利用延迟的数据融合和延迟的认证两种思想来实现, 通过将传递过来的每一个报文直接地转发给下一个节点而并不进行任何修改, 然后在第二个节点处进行数据融合, 以抵御恶意节点入侵和单一密钥被俘获等威胁。

基于 Hash 树的完整性鉴别方案主要基于 Merkle-Hash 树的思想, Merkle-Hash 树由单向散列函数和完全二叉树组成, 其有两个特点: ① 当确定好根节点之后, 其他节点的值将无法改变; ② Merkle-Hash 树不需要同时公布其他节点的值就可以认证一个叶节点的值。将 Merkle-Hash 树的思想引入到无线传感器数据融合中来, 可对数据的完整性进行验证。该方法通过对叶节点探测到的数据 MAC 值建立 Hash 树, 通过数据融合—提交—交互式证明这三个步骤验证数据融合结果的完整性。可见, 即使攻击者捕获了汇集节点并且篡改了数据融合结果之后, 网络依然具备很强的鲁棒性, 虚假的数据将会被检测出来, 保证了用户接收结果的真实性。

基于监督和信誉机制的完整性鉴别方案包括多种典型算法, 如 SELDA (Secure and Reliable Data Aggregation) 协议、RDAT (Reliable Data Aggregation and Transmission) 协议及 WDA (Witness-Based Approach for Data Fusion Assurance) 协议。其中 SELDA 协议的基本思想是传感器节点利用监视机制, 探测邻居节点的可用性、感知和路由能力及异常行为, 然后使用贝塔分布函数对这些异常行为进行量化, 建立信任级别, 最后节点之间交换它们的信任级别从而构建一个信任网。节点通过信任网决定一条到融合点的安全和可靠的路径。SELDA 一个重要特性是由于采用了监视机制, 因此能够及时检测出受 DoS 攻击的融合点。

### 7.3.5 入侵检测技术

在无线传感器网络中, 完全依靠密码体制不能抵御所有攻击, 特别对于内部攻击, 密钥体制往往无能为力。针对网络安全防御措施的不足, 入侵检测技术应运而生, 它可以检测网络中违反安全策略的行为, 及时发现并报告系统中未授权或异常的现象, 并有效地采取相应的保护措施。入侵检测作为一种主动的入侵防御技术, 已经发展成为无线传感器网络安全体系中的一个关键组件, 其积极、主动的防御思想, 完全区别于加密、认证等传统的被动防御方式, 正引领无线传感器网络安全从被动走向主动。也正因为如此, 入侵检测系统被称为无线传感器网络的第二道防线。

入侵检测系统的正常运作基于一个合理假设: 恶意节点的行为与网内其他节点存在明显的不同, 以至于入侵检测系统可以根据预先设定的或者学习到的规则将其识别出来。因此, 可将传统 Ad Hoc 网络中的入侵检测系统分为基于规则的入侵检测系统和基于异常的入侵检测系统。基于规则的入侵检测系统用来探测已知的入侵行为; 而基于异常的入

入侵检测系统用来探测未知的入侵行为。基于规则的入侵检测系统的误报警率比基于异常的入侵检测系统低，但基于异常的入侵检测系统比基于规则的入侵检测系统能识别更多的入侵行为。

由于无线传感器网络应用具有多样性，而且缺乏网络拓扑结构、预期通信方式和常规用法等信息，所以在传感器节点中预先设置某些固定的规则来识别入侵行为是不切实际的。同时，由于传感器节点的能量、存储等限制，在节点部署后，通过学习的方式来建立入侵识别规则也是行不通的。因此，目前传统 Ad Hoc 网络中已有的入侵检测系统无法应用于无线传感器网络。

总体来看，无线传感器网络入侵检测技术的研究依然处于起步阶段，目前已经提出了一些较好的入侵行为检测方法，如博弈论框架、基于免疫原理的入侵检测和基于代理 (Agent) 的入侵检测算法等，不过如何设计高效实用的轻量级入侵检测方法仍然是目前研究的热点。

### 1. 博弈论框架

无线传感器网络安全防御问题可视为攻击者与网络防御两者之间非协作的博弈，攻击和防御双方每次动作都必须消耗一定的资源，并能获得相应的收益，从而使得它也符合博弈论的天然特性，因此运用博弈论来解决无线传感器网络安全问题成为近年来一个新兴的研究方向。

假设网络为分簇结构，入侵检测是以簇为单位进行保护，而攻击者的目的是扰乱网络正常功能，在同一时刻攻击者只能攻击一个簇，因此攻击者可以有三种攻击策略：攻击簇  $k$ ，不攻击和攻击其他簇  $k'$ 。入侵检测可以有两种防御策略：防护簇  $k$  和防护另外一个簇  $k'$ 。在此基础上，可以建立支付关系矩阵为

$$\mathbf{A}_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

式中，矩阵  $\mathbf{A}_{ij}$  中的  $a_{ij}$  表示入侵检测的支付。攻击者付出矩阵  $\mathbf{B}_{ij}$  定义为

$$\mathbf{B}_{ij} = \begin{bmatrix} \text{PI}(t) - \text{CI} & \text{CW} & \text{PI}(t) - \text{CI} \\ \text{PI}(t) - \text{CI} & \text{CW} & \text{PI}(t) - \text{CI} \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

式中， $\text{PI}(t)$  为每次攻击的平均收益， $\text{CI}$  为攻击者入侵的成本， $\text{CW}$  为等待并决定攻击的所需成本。

可见，入侵者与入侵检测系统之间的博弈是利益冲突的博弈，双方都希望能够最大化自己的利益，攻防双方之间强调个人的理性。因此，入侵者和入侵检测系统之间的利益是完全对立的，网络入侵和入侵检测的过程是一个非合作、有限次重复的对抗性博弈。

然而这种模型往往都只针对单个目标，攻击方的策略通常只有攻击与不攻击两种，

并且双方都假设只存在一个攻击源。然而实际中,无线传感器网络通常部署有大量的传感器节点,每个节点都可根据情况触发不同级别的防御强度,消耗不同的能量;网络中也可能存在多个攻击源,每个攻击源可以发起不同强度的攻击,并且不同的攻击源对多个不同节点的攻击可同时发生,多目标、多强度攻击的假设更加符合无线传感器网络的现实环境。因此研究基于多节点和多攻击源的博弈模型是无线传感器网络入侵检测发展的一个方向。

## 2. 基于免疫原理的入侵检测

免疫系统是一种自适应、分布式的高效生物入侵检测系统,它在识别、学习和记忆病原体的方面与无线传感器网络入侵检测系统的任务非常相似。免疫系统优良的特点对于开发无线传感器网络入侵检测系统具有借鉴意义。

### 1) 分布性和健壮性

免疫系统中的淋巴细胞分布于全身,根据周围的环境自适应地确定识别过程,整个免疫系统是一个没有控制中心的并行分布式系统。免疫系统在整体上是健壮的,局部免疫功能的失常不会引起整个免疫系统的崩溃。免疫系统的分布性和健壮性非常适合作为针对无线传感器网络这样的自组织网络的入侵检测模型。

### 2) 高效性和自适应性

模糊结合机制和记忆免疫细胞使免疫系统能够快速准确地识别类似抗原。初次应答过程中达到激活阈值的 B 细胞被激活并发生克隆选择,以产生能与抗原匹配且能应付抗原变种的多样性抗体,从而使免疫系统具有很强的自适应能力。入侵检测中借鉴这种不完全匹配和记忆机制,可使系统只需产生较少的检测子就能检测到大量的入侵行为,并当再次遇到相似攻击时能够快速做出响应,从而很好地解决目前无线传感器网络入侵检测系统无法自动检测新攻击手段或已知攻击手段的变种问题。

### 3) 动态平衡性

各种免疫细胞通过特异性联结起来连续不断的识别抗原,相互促进或抑制,自我调节,组成一个动态平衡的免疫网络,以维持机体免疫应答的相对稳定状态。无线传感器网络正是处在一个充满攻击和通信错误的动态环境中,只有网络对攻击具有免疫力才能保证整个网络系统的安全运行。

目前,基于免疫原理的入侵检测技术经过计算机网络的测试具有高准确率、自适应性等优点,但其计算较复杂、通信负荷较大以及采用集中式的管理方式,所以直接将其应用于无线传感器网络并不现实。针对传感器节点处理、存储能力和能量约束等条件,研究者基于免疫原理提出一种轻量级入侵检测模块,如图 7-2 所示。

监听模块在训练期向入侵检测模块提供监听到的正常路由数据包作为自体串的来源,在入侵检测期提供监听到的邻居路由包供检测之用。在检测到入侵行为后,入侵检

测模块通过发送模块将入侵警报通过无线信道发送至汇聚节点。接收模块的主要作用是接收从监控主机传来的指令，将一些入侵检测系统错判的自体串添加到自体库中。入侵检测模块内部主要分为特征提取、检测子产生、检测和克隆选择四个子模块及自体库、检测子库两个数据库。

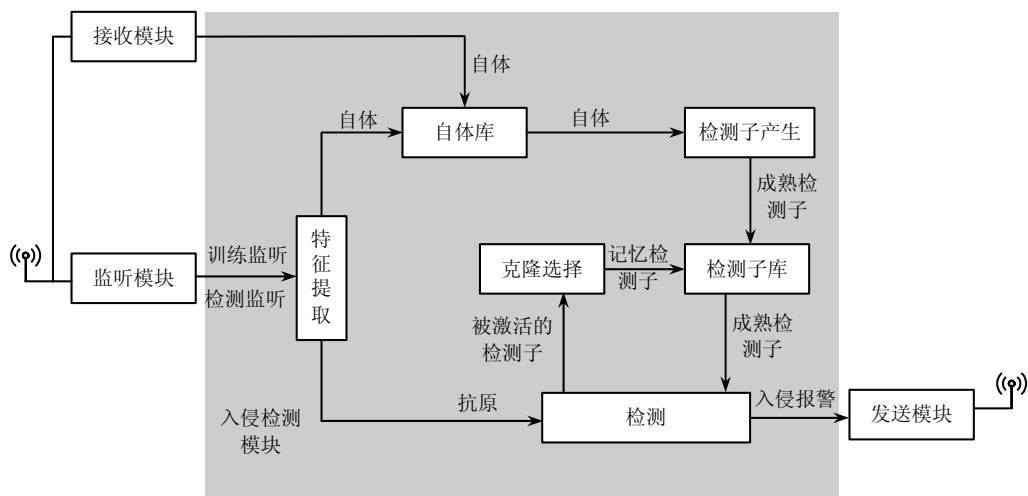


图 7-2 入侵检测模块结构图

### 3. 基于代理的入侵检测

基于多重代理的入侵检测方案是一种分布式的异常检测模型，无线传感器网络中的每个节点都是一个检测节点，各自拥有监视 Agent、检测 Agent、响应 Agent 及管理 Agent 四种代理模块，其相互关系如图 7-3 所示。

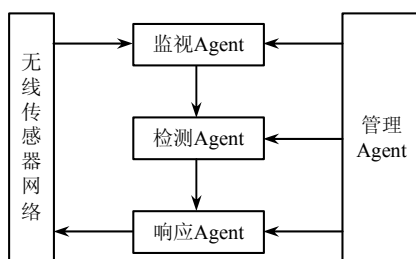


图 7-3 代理模块交互关系

#### 1) 监视 Agent

在每个传感器节点上都配置监视 Agent，如果它位于普通节点上，负责在本地监视收集簇头的行为信息；如果位于簇头上，则负责监视收集整个簇内成员节点及其邻居簇头的行为信息。这些信息经过数据融合、提取之后被发送给各自节点上驻留的检测 Agent，由检测 Agent 进行下一步处理。

## 2) 检测 Agent

检测 Agent 也配置在每个节点上, 负责分析监视 Agent 收集到的数据信息, 判断是否有入侵发生, 是整个入侵检测系统最核心的部分。考虑到检测的数据源大多是基于本地的、不完整的数据信息, 检测方法应以异常检测为主。目前异常检测技术有概率统计、神经网络、数据挖掘等多种分析方法, 误用检测技术也有专家系统、模型推理和模式匹配等多种分析方法。目前, 主要的检测方法为误用检测和异常检测两种方法。

## 3) 响应 Agent

在检测 Agent 发现并判断有入侵发生时, 立即将配置在节点上的响应 Agent 激活, 由响应 Agent 根据具体的情况采取相应的响应措施, 如降低对可疑节点信任度, 切断对方与自己的通信, 更新通信密钥和重新进行身份认证等。

## 4) 管理 Agent

管理 Agent 一样也是配置在网络中的每个节点上, 并与其他每一模块通信。它的任务是负责对监视 Agent、检测 Agent、响应 Agent 进行管理和维护, 并协调它们的工作。

利用 Agent 能够独立自主连续运行的特点, 在入侵检测中使用 Agent 技术增加了系统的可扩展性, 改善了单点失效带来的问题, 提高了系统的容错能力; 同时利用 Agent 编程灵活, 易于实现等优点, 节省了系统的开销。目前来看, 代理技术比较适合无线传感器网络入侵检测需求, 且已经成为一个研究热点。





## 第 8 章

# 无线传感器网络军事应用实例

与民用无线传感器网络不同，无线传感器网络军事应用具有很强的军事特色，其目标更强调对军事或作战行动带来的促进作用和倍增效果，并且其系统功能、流程和关键技术设计与作战目的密切相关。因此，本章将结合无线传感器网络在战场态势感知、目标定位跟踪、单兵系统、其他应用领域重要目标防护开发等的军事应用实例，介绍无线传感器网络在典型军事应用领域中的应用思路、系统组成、部署模式、功能效果以及开发流程等，为推广和深化无线传感器网络在军事领域中的应用提供初步指导。



## 8.1 概述

信息化战争要求作战系统“看得明、反应快、打得准”，谁在信息的获取、传输和处理上占据优势，取得信息优势，谁就能掌握战争的主动权。正在兴起的无线传感器网络提供了一种新的信息获取和处理方式，它的“无处不在”、自组织、低成本、高隐蔽性、高抗毁性、高容错性和实时战场感知能力，与传统有线网络和无线移动网络相比优势明显，是现代战场中新的“触角”和“耳目”，能在多种军事应用中满足军事信息获取的实时性、准确性和全面性等需求，已逐步成为军事信息系统中不可或缺的重要感知手段。

目前，在《2020 联合构想（Joint Vision 2020）》和网络中心战概念中，无线传感器网络都被看做是 C4ISRT 系统重要的组成部分，用来提供丰富、实时的战场信息，满足作战力量“知己知彼”的要求。并且，随着重视程度的提高和信息技术的不断发展，越来越多的军事应用中出现了无线传感器网络的身影。如图 8-1 所示，无线传感器网络已经初步运用于军事应用的多个方面，如战场态势感知、目标定位跟踪、单兵系统、智能武器、目标毁伤效果评估、后勤与装备保障及重要目标防护等领域。

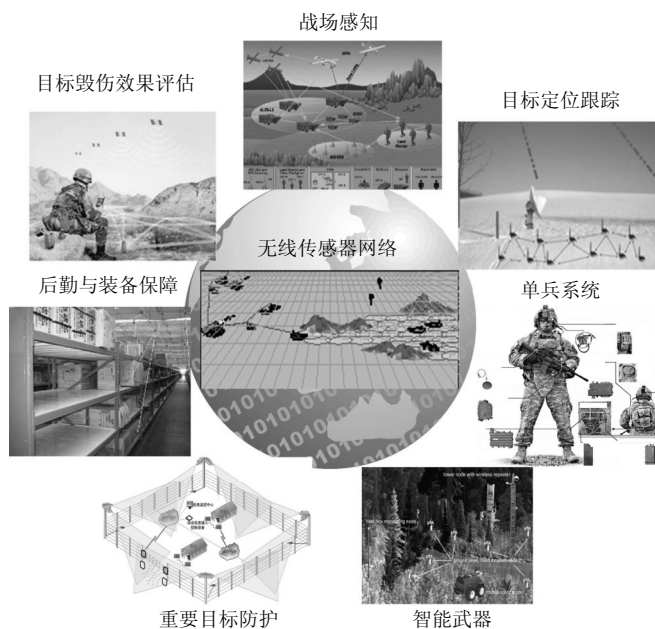


图 8-1 无线传感器网络军事应用领域

下面，就无线传感器网络在战场态势感知、目标定位跟踪、单兵系统、其他领域应用及重要目标防护等方面的具体应用实例和开发实例进行分析介绍，以促使无线传感器网络在军事应用中的成熟与落地。

## 8.2 战场态势感知应用实例

21 世纪信息时代的现在战争被喻为“感知者的胜利”，在新的军事竞争背景下，战场感知至关重要，是掌控“透明战场”的关键。最近高技术局部战争表明，谁拥有感知战场态势的能力，谁就能够透彻地了解对手，掌握敌情，洞察环境，先敌决策，快于对手行动，从而完全控制战场赢得战争胜利。众所周知，现代战争已经从“大吃小”进化到了“快吃慢”，在“发现即摧毁”的信息化战场环境下，没有比“早知道、多知道”和“快决策、快行动”更重要的了。增强战场感知能力，既是军事信息技术发展和应用的必然结果，也是当今世界各军事强国信息化建设的重点。

传统战场环境感知的主要技术手段是卫星和雷达，它们属于远距离、大范围探测技术体制。随着信息化战争在更高的时空分辨率尺度上展开，需要具有对战场环境实时、连续、精确的现场探测与监测能力。因此，具有传感、定位、无线通信、自组织、数据处理能力的智能传感器网络技术应运而生。

智能传感器网络（也称无线传感器网络）是由多个或多类智能微型传感器组成的自组织网络，它不依托固定的中转基站，该网络能自动收集目标的多个特征信息，综合出目标的多个属性信息，进而提高对战场态势感知的实时性、连续性、准确性和可靠性。它从一个全新的视角（即“零距离”或“沉浸式”）观察战场环境，能提供与战场位置绑定的战场环境状况的实时“快照”和精细变化的描述。智能传感器网络与卫星、雷达等中远距离监测装备和常规探测技术组成网络，将构成集宏观与微观、长期与实时、移动与定位为一体，实现对战场物理环境从宏观尺度到微观尺度的“全维无缝”感知。目前，各主要国家都将此技术视为战场态势感知技术的一次革命性的飞跃。

目前，战场感知智能传感器网络是由一组传感器以特定感知应用需求的方式构成的无线网络，其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖的地理区域中感知对象的信息，并发布给观察者。每个微型传感器尺寸虽小，但它却拥有电源、传感器、嵌入式处理器、存储器、通信部件、定位器、移动器和软件等一系列功能模块。因此它涉及 MEMS 技术、无线网络与通信技术、微型电源与能源再生技术、嵌入式操作系统与数据库技术、多源数据融合技术、全球定位技术、虚拟战场环境再现技术等诸多新兴学科。正是因为传感器节点本身具有智能体系和全面软件的支持，具有巨大潜在的应用优势，自 2000 年始，美国国防部就把“智能传感器网络”定义为 21 世纪国防部科学技术五个尖端研究领域之一。

智能传感器网络典型的应用模式是传感器节点通过飞机抛撒的方式布设到目标战场区域，形成密集型、随机分布的无线传感器网络，使其可在隐蔽地近距离探测，收集战场空间内震动、压力、声音、速度、温度、湿度、磁场和辐射等信息，进行全面战场感知，并及时向相关作战人员提供实时或近实时的战场信息，包括战场空间内敌方的兵力部署、武器装备和战场环境（如登陆作战中敌方岸滩的翔实地理特征信息，丛林地带的

地面坚硬度、干湿湿度等) 信息, 以支撑作战应用需求。

智能传感器网络与传统的网络相比具有以下优点: ① 容错能力强, 智能传感器网络的设计采用了高冗余设计理念。② 系统性能好, 智能传感器与探测目标的近距离甚至是零距离的接触大大消除了环境噪声对系统性能的影响。③ 探测区域广, 多传感器节点可以联合探测, 覆盖区域面积较大。④ 探测区域无阴影和盲点, 借助于个别具有移动能力的传感器节点对网络拓扑结构进行调整有效地消除了探测区域内的阴影和盲点。⑤ 价格低廉, 工业化大量生产造价低且易部署、免维护。⑥ 抗干扰能力强, 部署广且能混合部署。⑦ 抗毁能力强, 部分传感器节点毁坏后, 网络可重新自组织形成新的拓扑。

正是由于无线传感器网络在战场感知方面具有巨大的优势, 因此被世界军事强国广泛研究和应用, 其中典型的代表包括美国自 20 世纪 90 年代一直研究的“智能微尘”项目, 美军针对网络中心战而研制的“灵巧传感器网络”, 以及美军最近确定的“战场环境侦察与监视系统”等, 以期通过新型传感器技术和无线通信技术增强战场感知能力, 通过信息优势, 倍增军事打击的实力。

## 8.2.1 智能微尘

“智能微尘”(Smart Dust)的概念是在 1994 年首次提出, 由美国国防部资助、加州大学伯克利分校实施的一项研究课题, 旨在开发出具有低成本、低功率、毫米级大小的超微型传感器。这些微型传感器节点由传感器、微处理器、通信系统和厚膜电池组成, 如图 8-2 所示。

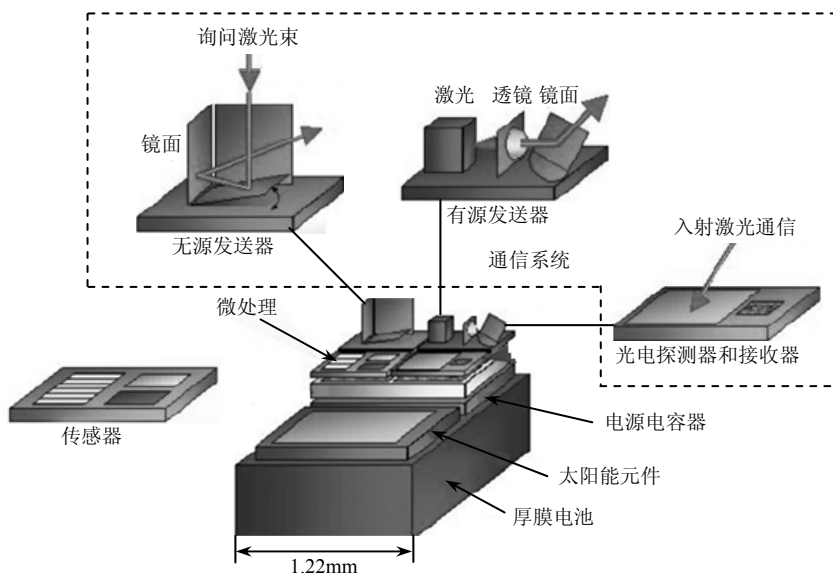


图 8-2 智能微尘结构图

其中,厚膜电池用于为传感器提供正常工作所必需的能源;传感器用于感知、获取外界的信息,并将其转换为数字信号;微处理器负责组织协调节点各部分的工作,如对感知部件获取的信息进行必要的处理、保存,控制感知部件和电源的工作模式等;通信系统负责与其他微尘通信;软件给传感器提供必要的软件支持,如嵌入式操作系统、嵌入式数据库系统等,通过编程来实现各种不同的功能。

这些智能微尘以自组织方式构成无线传感器网络,是一种不需要任何基础设施的自构造、自组织和自管理的网络。并且这些微型传感器节点能够相互定位、收集数据并向观察者传递信息。如果任何一个微型传感器功能失常,其他微尘可对其进行修复,并不会影响观察数据的获取。智能微尘被广泛应用于目标环境温度、光亮度和震动等信息的监测,甚至被用于感知周围是否存在辐射或存在有毒的化学物质等。可以说,智能微尘的出现和智能微尘网络的发展给相关应用带来了一种新的信息获取和处理模式,正在广泛用于军事领域,其中典型应用有重点路段监测和敌方防区感知等。

### 1. 重点路段监测

美军为了对目标区域核心路段进行隐蔽性监测,以跟踪识别过往车辆,专门研制了针对重点路段监测的智能微尘,该智能微尘由主板、电源板和传感器板三个模块组成,其中传感器板采用 Honeywell 公司生产的精度为 1m Gauss 的双轴磁力计,该磁力计信号频率为 5Hz;为了更好地微型化,处理器和通信模块均集成到主板上;电源板采用节能模式设计以延长供电周期,具体方法是通过每秒钟关闭磁力计一次,并且此时开启通信系统进行数据接收和发送来降低能耗,从而使原本只够整个系统使用一个小时的电量在节能模式下可至少使用三天。整个智能微尘节点仍保持体积微小的特点,其重量不到 30g。

其应用模式是通过无人机在重点路段进行随机布撒,智能微尘节点通过自组网技术实现网络拓扑结构生成、节点间时间同步以及相互间的通信和定位,如图 8-3 所示。当智能微尘网络生成之后,智能网络微尘节点利用自身携带的磁力计传感器探测路段上出现的车辆,包括探测出在 5m 内的摩托车、电动车、自行车以及 10m 内的汽车,并给出具体位置信息。获取车辆信息后,智能网络微尘节点可对感知信息集中存储后发送给无人机,也可以通过多跳通信实时发送给无人机,无人机再将感知信息发送给地面站进行处理和分析,以实现重点路段的监测。

### 2. 敌方防区感知

智能微尘具有获取多方位信息、隐蔽性强、与探测目标近距离接触等优势,可被大量地装置在宣传品、子弹或炮弹壳中,在敌方防区进行抛撒,形成无线监测网络,使其探测敌方的军事力量部署、武器装备情况和战场环境等信息,全面实时跟踪和掌握敌方军事行动,为己方指挥决策和火力打击提供情报支撑。智能网络微尘敌方防区感知示意图如图 8-4 所示。

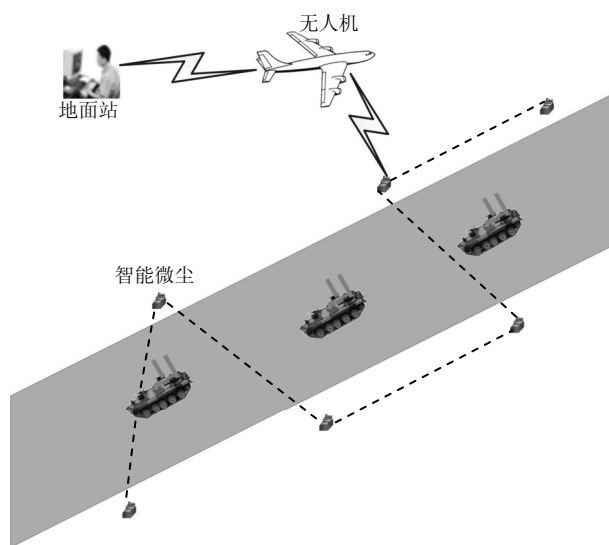


图 8-3 智能微尘重点路段监测示意图

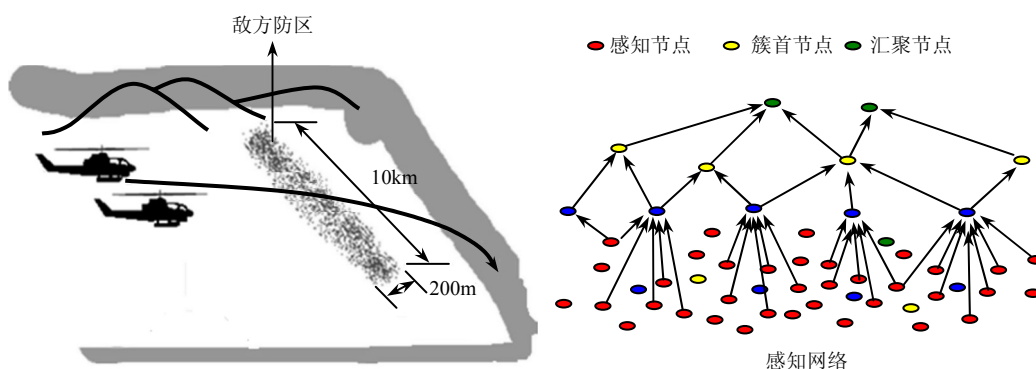


图 8-4 智能微尘敌方防区感知示意图

智能微尘在目标区域进行秘密撒布，落地后的智能微尘自动启动，并通过广播消息进行相邻智能微尘节点的发现，快速自动生产自组织网络，并实现初始化设置、时间同步、节点定位和通信链路的建立，协同收集目标区域敌方信息并向远程基站传递信息。除此之外，智能微尘还可以感知战场环境中地形、地貌、气象和水文等信息，为构建战场环境态势提供信息支撑。

正是因为智能微尘在战场感知方面具有巨大的应用潜力和优势，美国国防部将其列为重点研究项目，并且不断尝试将其应用于水下防区感知，通过潜水艇将智能微尘撒布在水中，来监测水面和水下的各种变化，以发现异常目标。最近，美军还尝试将智能微尘应用于无人机编队飞行（军事侦察通常需要多架无人机协同完成任务，这就需要多架无人机之间保持一定的距离和方位，以满足安全需求和执行任务的需求），通过在每架无人机上安装一个或若干个智能微尘节点，利用它们组成自组织无线网络，实现飞机间距

离和方位的测量,以辅助实现多架无人机之间的协助。这种方法可以在基本不增加无人机测控系统负担的情况下工作,并可有效保证无人机队形的稳定。

在军事领域,虽然智能微尘具有极广泛的应用前景,而且研究人员都在积极推动智能微尘技术在军事各个领域的应用,但智能微尘在技术实现上要达到成熟应用的程度,还有很长的路要走,目前来看主要存在以下四个方面的问题。

#### 1) 能量问题

能量问题一直是无线传感器网络走向实用化的关键问题,目前美国加州大学伯克利分校的塞德-卢获正在研究一种燃料电池,这种电池吸收周围工业机械设备振动产生的能量,或者从低度光源收集能量,通过能量自供给大大延长智能微尘的工作时间。但是该技术距离实用化还有很长的路要走,目前来看有望在5年内实现突破。除此之外,采用软件技术实现智能微尘在无工作状态下的“休眠”,也可以延长智能微尘的工作时间,但是目前仍不能很好地满足军事应用需求和低功耗需求。

#### 2) 尺寸问题

在尺寸方面,目前的技术手段还不能达到预期的大小,但是在未来几年内有可能把几个功能半导体集成到一个半导体上,使5mm级的微尘芯片缩小到1mm,这将极大地丰富智能微尘的应用前景。

#### 3) 通信协议问题

在智能微尘间的通信协议方面,目前还缺乏一个满足军事应用的完善协议。现代工业界的IEEE802.15.4协议以及ZigBee协议等虽然在民品领域得到广泛的应用,但是这些低功耗协议主要应用于计算能力和存储能力较强的传感器节点,对于计算和处理能力较弱的智能微尘节点,这些协议并不适合。因此,需要针对智能微尘节点的通信特点研制专用协议。

#### 4) 安全问题

智能微尘在军事领域的应用,面临多种安全问题,首先在硬件方面需要智能微尘节点能够自销毁,防止被发现后进行硬件解密;其次智能微尘之间的通信需要轻量级、安全性高的加密协议,即能不过分消耗能量又能防止被敌方破解;最后,智能微尘形成的无线监测网络需要安全机制防止敌方恶意节点注入虚假信息,防止部分节点被恶意重新编程后发送垃圾信息,导致网络能量消耗严重和通信堵塞。

近几年,由于硅片技术和生产工艺的突飞猛进,集成有传感器、计算电路、双向无线通信模块和供电模块的微尘器件的体积已经缩小到了沙粒般大小,但它却包含了从信息收集、信息处理到信息发送所必需的全部部件。未来的智能微尘甚至可以悬浮在空中几个小时,收集、处理和发射信息,并能够仅依靠微型电池工作多年。智能微尘的远程传感器芯片能够跟踪敌人的军事行动,可以把大量智能微尘装在宣传品、子弹或炮弹中,

在目标地点撒落下去，形成严密的监视网络，使敌国的军事力量和人员、物资的流动一清二楚。

可以预见，未来智能微尘将向深入研究和广泛应用两个方向发展。一方面随着 MEMS 技术和 CMOS 工艺的进步，将进一步推动智能微尘的微型化和集成化，同时对能量供给单元的深化研究将极大促进智能微尘的实用化；另一方面，随着智能微尘技术的日趋成熟，其应用领域将会不断扩大，特别是在信息化局部战争中将会发挥越来越重要的作用，成为数字化战场的“神经末梢”，不仅可以应用于陆地战场进行感知，还可以应用于空中和水下监测，终成为立体战场感知网络的重要组成部分。

## 8.2.2 灵巧传感器网络

灵巧传感器网络（Smart Sensor Web, SSW）是美国陆军 2001 年针对网络中心战的需求所开发的多层次集成传感器网络，并确立为未来目标部队的关键组成部分，如图 8-5 所示。灵巧传感器网络的核心思想是在战场上布设大量的传感器以收集中继信息，并对相关原始数据进行过滤，然后再把那些重要的信息传送到各数据融合中心，从而将大量的信息集成为一幅战场全景图，当参战人员需要时可分发给他们，使其对战场态势的感知能力大大提高。这些传感器大多是无人值守的，常采用抛撒方式部署在战场环境中，通过无人飞行器和机器人形成多层次网络，利用多种传感器间的协作，成倍提高单一传感器的能力，从而实现全面的战场感知。

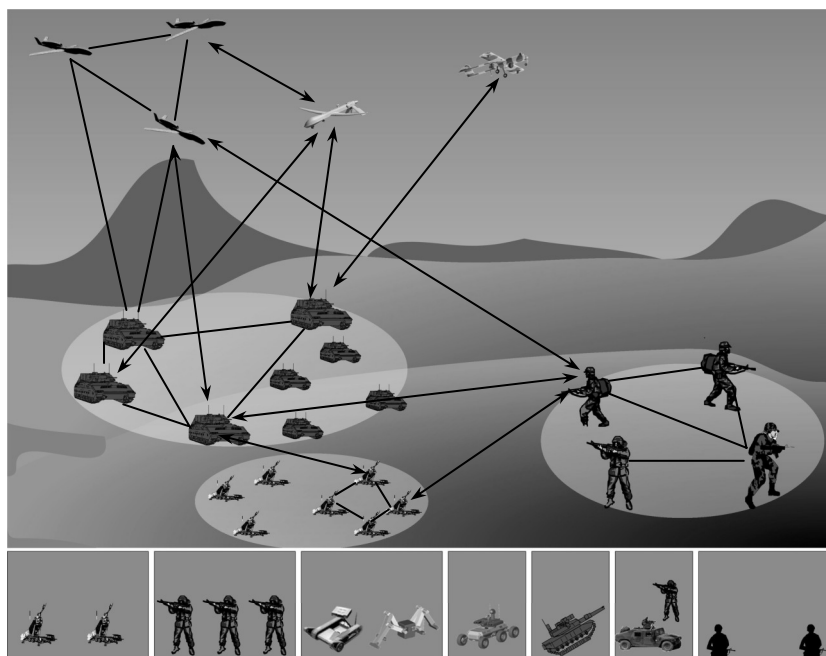


图 8-5 灵巧传感器网络



其中,布撒的传感器通过协同感知形成前端探测系统,并对原始数据进行滤波处理,通过无人飞行器中继传送给各级融合中心;无人值守弹药和机器人也可以通过携带的传感器将自身状态信息传送给融合中心,融合中心将大量感知信息进行识别和判断,形成整个战场态势全景图,并根据参战人员需求进行实时分发,全面提高各参战单位对战场态势的感知能力。

可见,灵巧传感器网络是关于传感器基于网络平台的集成,在无人值守弹药、布撒传感器、机器人以及无人飞行器之间形成了自主工作的无线传感器网络,通过主体交互作用方式实现协同联动工作。例如,一个被触发的传感器主体可能会要求在其范围内激活其他传感器,达到对前后相关信息的澄清和确认。若确认成功后,该信息可同来自飞行器或武器层的灵巧传感器网络中的信息相结合,形成高级感知态势图,如一幅有关作战环境的全景图。为了提高实时性和规范化,灵巧传感器网络系统软件采用预先制定的标准来解读各类传感器的内容,将它们与诸如公路、建筑、天气和单元位置等相关信息进行融合,以及与其他传感器输入的信息进行相互关联,形成感知态势图,为实时指挥决策提供支撑。

为了验证灵巧传感器网络的可行性和适用范围,美国国防部进行了五次试验。其中第一次试验主要用来验证各种类型的感知信息对各个参战人员的有用程度,以优化传感器节点感知信息类型以及获取信息融合重点方向;第二次试验主要验证灵巧传感器网络“信息体系结构”,以确定如何在战术环境下建立一个无线传感器网络,使战术环境与所使用的灵巧传感器网络模式相一致;第三次试验是灵巧传感器网络中“传感器集成”试验,主要评估如何使各种传感器相互协调配合,提供更加详实、全面和实时的感知信息,以有利于融合中心生成清晰、扼要的战场全景态势;第四次试验是灵巧传感器网络的“数据处理”试验,以确定各种信息处理方式,使其满足供参战人员使用的最佳信息处理方法;第五次试验是灵巧传感器网络的“信息展示”试验,以确定高效、简洁的可视化方法展示战场感知信息,以有利于参战人员的快速了解相关信息,方便进行决策和判断。

目前来看,灵巧传感器网络能自动收集战场目标的多个特征信息,通过传感器协作和数据融合提高对战场态势评估的准确性和可靠性,适应了信息化战争的需要,具有巨大的军事应用价值。也正是因为如此,美军将其作为一个重要军事战术工具向战场指挥员和相关作战人员提供实时或近实时的战场信息。不过,美军在研制和开发灵巧传感器网络的过程中,也遇到了下述一系列问题。

#### 1) 网络带宽受限问题

灵巧传感器网络以无人飞行器作为中继节点进行通信,由于传感器节点与无人飞行器之间通信信号衰减等问题,导致通信范围和通信带宽受到严格限制,从而使图像传感器等无法获得足够的通信带宽支撑,导致融合中心无法将战场态势快速发送给参战人员。

## 2) 节点能量受限问题

传感器节点能量直接决定了灵巧传感器网络的生命周期,因此尽可能降低传感器节点的能耗成为关键。目前灵巧传感器网络通过休眠模式来保存传感器节点电池的使用寿命,还通过更有效的协议降低传感器节点处理数据的能量消耗,以及通过传感器与通信模块的集成设计以降低能量消耗。

## 3) 互操作性问题

灵巧传感器网络涵盖战场前端感知设备、无人值守弹药、机器人、空中飞行器以及指挥人员等,形成了多层次感知体系,然而各个层面的战场信息实时访问和触发仍存在系列问题。例如,战场前端感知设备通过目标发现如何快速触发无人值守弹药或机器人进行火力攻击,以及作战人员与传感器之间的协作问题等。

## 4) 信息融合问题

灵巧传感器网络涉及磁、声、光、气象监测和水文监测等多种传感器,甚至还涵盖多种雷达探测信息和三维地图信息等,如何高效进行信息融合,形成一致性战场态势认知,并满足态势分发共享实时性需求,是急需解决的问题。

随着灵巧传感器网络的进一步发展和演进,可以预见无线传感器网络的军事应用模式已经从早期的定点环境监测,逐步发展到当前的随机情报获取模式,并逐步向具有攻击毁伤能力的自主反应模式演进。最典型的是美国近年来强调的“网络中心战”、“行动中心战”和“传感器到射手”等作战模式,都是典型的自主反应模式,不仅强调利用传感器组网来提高态势感知能力,还强调将传感器探测到的目标信息通过网络系统传输给武器装备,为武器装备射击提供及时的信息。可见,随着传感器技术的发展,无线传感器网络将在军事应用中发挥越来越重要的作用。

# 8.3 目标定位跟踪应用实例

对于军事应用而言,可靠、精确地定位与跟踪目标具有十分重要的意义,特别是随着信息化、网络化战争的发展,战场目标定位跟踪将显得尤为重要。传统的目标定位跟踪问题可以追溯到第二次世界大战前夕,即世界上第一部跟踪雷达 SCR-28 的出现,在此之后各种雷达、红外、声纳、激光等目标定位跟踪技术相继发展并迅速得到完善。可以说,目标定位跟踪技术在战场感知系统中具有重要的地位和作用,特别是对于现代化战争所要求的“指挥控制精确化”和“发现即打击”等目标,都需要不断采用新技术来完善和提高战场目标定位跟踪的性能。

信息化战争要求作战系统“看得明、反应快、打得准”,而打得准的关键是对目标进行定位跟踪。由于隐形、伪装、电磁干扰等技术发展,导致传统定位跟踪系统很难满足现代化战争对战场机动目标定位跟踪性能的需求。近年来,随着无线传感器网络技术的

发展,其独特优势引起了军方、学术界以及工业界的极大关注,在战场目标定位跟踪方面开展了多方面的研究与应用。与传统的目标定位跟踪系统相比,基于无线传感器网络的目标定位跟踪系统能够满足以下五个方面的需求。

(1) 定位跟踪更精细。由于微型化传感器节点部署密度相对较高,对同一移动目标的探测、定位和跟踪往往有几十个甚至上百个传感器节点,减少了传统单节点监测可能产生的随机误差,从而提高了目标位置数据的测量精确度,更准确地反映出移动目标的实际运动情况。

(2) 定位跟踪更可靠。无线传感器网络的高度自治性和节点的高密度特点使得基于无线传感器网络的目标定位跟踪系统具有很高的鲁棒性和可靠性。当节点由于能量耗尽或非人为原因失效时,网络可以自动选择相邻节点代替当前节点,从而确保系统不会因为少数节点失效而导致目标定位跟踪任务失败。

(3) 定位跟踪更及时。由于传感器节点集成了多种类型的传感器,所以可以通过多种类型传感器对目标进行同步探测和监控,使得移动目标发现、定位和跟踪更及时。同时通过多个异构传感器节点之间的相互协同工作,分布式数据融合处理,使目标定位跟踪过程更为全面。

(4) 定位跟踪更隐蔽。由于传感器节点体积小,无线传输功率小,并且还可以对传感器节点进行伪装,甚至将传感器节点部署在地下,以使敌方很难发现正在工作的传感器节点,因此可对目标实现更隐蔽的定位跟踪。

(5) 定位跟踪更自治。无线传感器网络的自组织特点使得整个网络的初始化和运行过程是自动完成的,不需要人为干预。因此特别适合一些特定场合的目标定位跟踪应用,如恶劣战场、边海防和海底中的目标定位跟踪任务。

但是由于传感器节点受能量资源、存储资源和带宽资源的限制,再加上其计算能力和通信能力严重受限,基于无线传感器网络的目标定位跟踪系统设计面临很多困难,如硬件资源限制与定位跟踪质量要求之间的矛盾,节点能力的限制与定位跟踪系统高精度之间的矛盾,能量效率与数据实时性之间的矛盾等。因此,在基于无线传感器网络的定位跟踪系统的设计时需要考虑如下能耗有效性、实时性、鲁棒性和可扩展性四个方面的问题。

### 1. 能耗有效性

由于无线传感器网络目标定位跟踪大都应用于战场或条件恶劣的环境,更换电池几乎不可能,因此节点能耗的有效性是一个非常关键的问题。这就要求传感器节点不但能够储备能量,还要能够根据实际情况进行现场蓄能(如利用太阳能、周围环境的振动进行自供电),以实现网络负载均衡和尽可能延长整个网络的生命周期。同时,在定位跟踪过程中,需要制定协作策略,选择合适的传感器节点参与定位跟踪过程,在保证定位跟

踪性能的同时,优化传感器节点的通信能量消耗、感测能量消耗和计算能量消耗。

## 2. 实时性

实时性是目标跟踪系统设计需要考虑的另一个重要因素。在某些目标运动速度较快的场合(如导弹跟踪、战车跟踪等),需要对目标进行快速、准确的跟踪。然而由于监测到的目标位置信息具有很强的实时性,节点间的数据通信的实时性需要得到很好的保证,所以基于无线传感器网络的目标定位跟踪系统必须尽可能根据网内信息,计算目标的位置和运动轨迹,适应网络的动态变化,实时传输目标的位置和方向等信息,并尽可能减少网络的通信计算量和通信传输延迟。

## 3. 鲁棒性

目标定位跟踪的鲁棒性是指在网络拓扑结构变化或数据丢失的情况下,定位跟踪系统能够恢复或继续进行。当前应用于目标定位跟踪的方法主要有集中式和分布式两种,集中式方法要求所有网络节点在探测到目标后都要向汇聚节点发回探测结果,不但引入的通信开销大,而且计算开销也增加很多,还导致网络的可靠性下降。分布式定位跟踪方法是一种较好的选择,但是分布式方法需要充分考虑定位跟踪算法的鲁棒性,能够适应环境的变化,以增强定位跟踪的可靠性。

## 4. 可扩展性

在目标定位跟踪系统中,由于战场目标存在多种类型,并且通常数量较多,导致传感器节点探测信息类型多样,所采用的定位跟踪算法也不尽相同。这就要求目标定位跟踪系统具有较好的可扩展性,能够适应多种类型的战场目标。

综上所述,基于无线传感器网络的目标跟踪系统的设计重点在于提高传感器网络能量效率、保证数据传输的实时性以及系统的可靠性,使得传感器网络能够完成目标跟踪任务的同时,最大程度地减少网络能耗,延长整个网络的生存时间。

目前,针对目标跟踪系统的应用需求和特点,基于无线传感器网络的战场目标定位跟踪系统被广泛研究,根据定位跟踪目标的不同,可以分为合作目标定位跟踪和非合作目标定位跟踪两种。其中,合作目标定位跟踪应用模式主要通过对我方或友方的各类作战要素、作战单元等协作目标进行感知、定位和跟踪,为实现战场各种作战力量的精细化协同指挥、调度和管理提供支撑。这种模式常应用于作战力量控制、军事装备运输,后勤物资供应等领域。非合作目标定位跟踪应用模式通过装备各类传感器或在某一区域抛撒多种传感器,实现对敌对目标、敌对活动的侦察、定位和跟踪,为实现“侦察一定位一打击”一体化提供支撑,常应用于隐蔽性敌对目标枪声定位,基于智能武器的敌对活动侦察打击以及战场传感器网络战等领域。下面将详细介绍无线传感器网络在目标定位与跟踪方面存在的典型应用系统,即枪声定位系统和战场目标定位跟踪系统。

### 8.3.1 枪声定位系统

狙击手具有打击精准、隐蔽性高的特点。根据伊拉克战争的相关报道：城市作战中狙击手是造成士兵伤亡的重要原因。据统计，越南战争期间平均每杀死一名士兵需要 20 万发子弹，而同时期的一名狙击手却平均只需 1.3 发。特别是新世纪以来，在美军发动的阿富汗和伊拉克战争中，美军的传统装备往往不能适应这些非对称作战的特殊环境，美军面对的敌人不再是大兵团正规军，而是飘忽不定的武装分子，美军遭受的更大威胁来自狙击手和路边炸弹。鉴于此，美军不得不大力发展反狙击定位系统装备，其中枪声定位系统便是其代表之一。

目前，枪声定位系统在国内外已有部分成形产品，相对来说，国外起步较早，成品较成熟，性能也较好。不过总体来看，枪声定位系统的基本方法一致，主要是通过检测在狙击枪打枪前后产生的各种光学、声学等特性进行定位。目前，主流的方法主要有两种，即基于麦克风阵列的枪声定位系统和基于无线传感器网络的枪声定位系统。

#### 1. 基于麦克风阵列的枪声定位系统

最早的声源定位技术是模拟人耳的定位技术，其原理是采用一对传声器来确定声源方向。随着技术的逐渐发展，到了 20 世纪 70 年代逐渐发展成为基于麦克风阵列的声源定位技术，其基本原理是通过呈一定拓扑结构排列的一组麦克风阵列来接收来自声源的信息，通过对各个麦克风接收到信号特征的不同进行分析，进而确定声源的位置。因此，麦克风阵列的排列不同，其获取声源信息的能力和精度也有很大区别。

目前，基于麦克风阵列的枪声定位系统主要包括三类：基于最大输出功率的可控波束定位方法、基于到达时间差的定位方法和基于高分辨率谱估计的定位方法。

##### 1) 基于最大输出功率的可控波束定位方法

基于可控波束的定位方法，是早期的一种定位方法。该方法的基本思想是采用波束形成技术，调节麦克风阵列的接收方向，在整个接收空间内扫描，能量最大的方位即为声源的方位。采用不同的波束形成器可得到不同的算法。该方法在满足最大似然准则的前提下，以搜索的方式，使麦克风阵列所形成的波束对准信号源，从而获得最大输出功率。即对麦克风所接收到的声源信号进行滤波，并加权求和来形成波束，进而通过搜索声源可能的位置来引导该波束，波束输出功率最大的点就是声源的位置。

从本质上看，可控波束形成技术是一种最大似然估计，它需要声源和环境噪声的先验知识。在实际使用中，这种先验知识往往很难获得。此外，最大似然估计是一个非线性最优化问题，这类目标函数往往有多个极点，且该方法对初始点的选取也很敏感。因此，使用传统的梯度下降算法往往容易陷于局部极小点，从而不能找到全局最优优点。若要通过其他搜索方法找到全局最优优点，就会极大地增加复杂度。

## 2) 基于到达时间差的定位方法

基于到达时间差的定位方法是一种双步定位方法。该方法首先估计信号到达不同麦克风之间的时间差,进而通过几何关系来确定声源的位置。对于这种方法,稳健的时延估计是进行准确定位的基础。

目前,现有的时延估计方法根据所利用的物理参量不同可以分为两类:① 利用互相关函数的时延估计方法,如广义互相关(Generalized Cross Correlation, GCC)法、最大似然(Maximum Likelihood, ML)加权法、互功率谱相位(Cross-power Spectrum Phase, CSP)法等;② 通过求取路径的脉冲响应来获取到达时间差估计值,如自适应最小均方(Least Mean Square, LMS)方法、特征值分解(Eigen Value Decomposition, EVD)法等。

基于到达时间差的定位方法计算量小,在实际系统中可以实时实现,因而获得了很多关注。然而该方法的不足之处在于:首先,估计时延和定位要分成两个阶段来完成,时延中的误差会进一步传递到下一步的位置估计中,由此产生误差积累,这在某种意义上只是对声源位置的次最优估计;其次,无论是基于互相关函数还是通过传递函数求取的时延,到达时间差估计都是以信号的采样数目来衡量的,采样率越高,可以达到的精度才会越高,这会对信号的采样频率产生特殊的要求。此外,基于到达时间差的定位方法比较适合单源的定位,而对多源问题则显得无能为力。

## 3) 基于高分辨率谱估计的定位方法

基于高分辨率谱估计的定位方法来源于一些现代高分辨率谱估计技术,如自回归模型、最小方差谱估计、多重信号分类方法等。该方法基本原理是利用接收信号相关矩阵的空间谱,通过求解麦克风间的相关矩阵来确定方向角,从而进一步确定声源位置。

与基于到达时间差的定位方法比,基于高分辨率谱估计的定位方法是一种超分辨率的估计技术,其空间分辨率不会受到信号采样频率的限制,并且在一定条件下可以实现任意定位精度,这一特性使它在阵列信号处理中获得了成功应用。然而,针对实际问题,该类方法也存在一定的不足,主要表现在:① 算法是利用相关矩阵中最大几个特征值来判定声源位置的,一旦有方向性噪声出现,且其能量与声源相差不大,就会误导查找方向,使算法找到方向性噪声的方向;② 反射作用使信号与干扰之间有一定的相关性,从而极大的降低了该方法的有效性;③ 这一方法需要对整个空间进行搜索来确定声源的位置,且其估计精度与空间的细分程度有关,因此计算复杂度偏高。

目前,应用比较广泛的是基于到达时间差的定位方法,其典型应用系统如美国Boomerang 狙击手探测系统,该系统是美国国防部先进研究项目局(DARPA)与通用动力公司研制开发的反狙击手枪声定位系统,可安装于悍马、装甲车等战斗车辆上。Boomerang 狙击手探测系统如图 8-6 所示。

Boomerang I 型狙击手探测系统由三部分构成:① 声传感器阵列。该阵列直径 1m,

由 7 个“麦克风”构成，安装在车尾桅杆的顶部，每个麦克风与桅杆顶端的轴毂相连；② 信号处理单元，包括处理器、PC-100 模/数转换插板、电源系统、音频功率放大模块、定制模拟到达时间差插件板。它采用 24V 车载直流电源，安装位于车辆后部的乘员座位下。PC-100 模/数转换插板上的闪存卡可存储 100 个射击数据文件，并可将其导出用于后续的分析 and 处理；③ 用户界面，由显示器、扬声器、GPS 等部分组成，安装在车辆的仪表盘上。该系统的告警装置采用 16 个红色发光二极管，以罗盘样式指示开火方位，也可通过扬声器发出声音警报。此外，通过磁铁吸附方式，在车顶还安装有公共无线局域网（如 Wi-Fi）信号增益天线，可实时传输数据。如图 8-7 所示。



图 8-6 Boomerang 狙击手探测系统

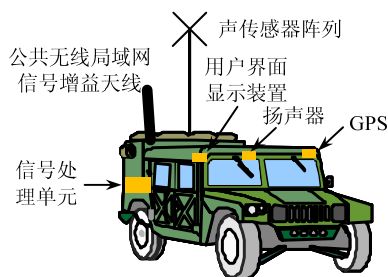


图 8-7 Boomerang I 车载狙击手探测系统

该系统的性能指标包括：能够在速度不超过 96km/h 的车辆上正常工作；在城市低矮建筑环境内，有效探测 50~150m 距离内的射击；在 1s 内迅速将射击方位锁定在 $\pm 15^\circ$  范围内，距离误差 1~30m，误警率低于 0.1%；能够适应沙漠作战环境。

随着技术的不断发展，Boomerang I 型狙击手探测系统也被不断改进，并逐渐形成 Boomerang II 型狙击手探测系统，它与 Boomerang I 型狙击手探测系统相比，其基本结构保持不变，技术改进主要包括：采用更紧凑的传感器阵列，阵列直径由 1m 降低到 0.5m，同时改进了阵列轴毂的机械结构和电气性能，使其能经受频繁的震动；加强了传感器阵列及其他部件的密封性，提高了抗恶劣环境的能力；改进了信号传输，II 型系统在轴毂处就将模拟信号转换为数字信号再做传输，从而避免了与战术电台间的电磁干扰；改进了探测定位算法，使系统能够精确测定来袭弹丸的水平方位、俯仰角和距离；改进了显示系统，增加了数字显示装置。Boomerang II 型狙击手探测系统能在 1s 内将狙击手位置锁定在 $\pm 2.5^\circ$ ；能适应各种气候环境，可在开阔地以及城市地形环境下正常工作；并且价格较为低廉，每套价格约为 1 万美元。

相类似的系统还有法国米特拉维公司研制的 Pilar 系统，该系统由探测阵列、数据采集处理模块和军用加固计算机 3 部分组成。Pilar 系统的探测阵列是由 4 个麦克风组成，工作时需要 2 个相距 50~400m 的探测阵列协同工作；数据处理采集模块用于对检测到的声学信号进行加工和处理；军用加固计算机用于管理整个系统，并且通过配备的可视化模块，可以查看狙击手位置的图片和录像。

## 2. 基于无线传感器网络的枪声定位系统

基于无线传感器网络的枪声定位系统主要原理是：通过向感兴趣区域撒布大量低成本的声响传感器节点，形成多跳自组织的传感器网络；通过声响传感器测量枪口及弹道冲击波的到达时间和到达角度，然后将探测数据传回基站；基站通过信息融合算法对射击点位置进行定位。与声传感器阵列相比，无线传感器网络各节点之间的拓扑结构关系要复杂许多，因此定位算法也更加复杂；但是由于无线传感器网络节点多，覆盖区域大，因此接收处理的数据量也更大、更全面，能够提供更为精确的定位结果，可以有效减少漏警等情况的发生。此外，基于无线传感器网络的枪声定位系统还可以在声信号极为复杂的环境中正常运行，并能对同时出现的多个目标进行定位。

相较于传统的定位系统，基于无线传感器网络的枪声定位系统具有部署方式更加灵活机动、部署更加隐蔽和环境适应性好等优点。

### 1) 部署方式更加灵活机动

对于室外系统，无线传感器网络可以采用飞机撒布、人工撒布和火炮发射等多种部署方式，适用于军事运用；对于室内系统，传感器网络可以部署于天花板、家具或地板等不易被发现的地点，不会影响美观。而传统的麦克风阵列为提高定位精度，通常体积庞大，无论室内室外均部署困难。

### 2) 部署更加隐蔽

由于传感器节点体积小，不容易被发现，并且可以将每个传感器节点进行伪装，有效降低被发现的概率。同时传感器节点可以有目的、间歇性地工作或采用低能耗模式进行工作，降低了被电磁波探测到的概率。

### 3) 环境适应性好

无线传感器网络对于环境条件的要求较低，适合于战场复杂恶劣的环境，同时由于无线传感器网络自组织和抗毁特性，即使单个或多个传感器节点被破坏也不致影响整个网络的功能，因此比较适合军事运用。

一般基于无线传感器网络的枪声定位系统的整体架构如图 8-8 所示，它由基站、传感器节点、射手三部分组成，其中传感器节点主要由麦克风、处理模块、无线射频模块、协议栈模块组成，并且传感器节点可以外接多种传感器，如温度传感器、湿度传感器、压力传感器、震动传感器、加速度计和磁力计等。

该系统运用麦克风探测震动波及枪口爆炸波，使多个传感器节点通过检测将探测到的信息传输到基站中心，基站中心对多个传感器数据进行融合处理来获得射手位置；同时该系统还可以对多个传感器检测到的信号进行分类比较，来排除回声干扰信号；为了提高枪声定位的精度，系统需要采用 GPS 或其他测量手段，对部署的传感器节点的位置坐标进行精确测量；最后，进行枪声定位计算，如果采用基于到达时间的定位估计方法，



则整个无线传感器网络需要精确的时间同步算法，以准确标记不同传感器节点检测到声波到达时间。

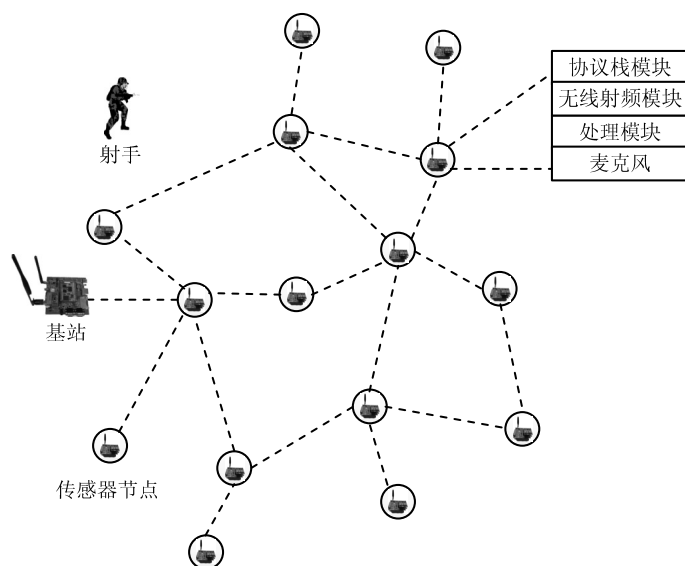


图 8-8 基于无线传感器网络的枪声定位系统整体架构

基于无线传感器网络的枪声定位系统还可以简化成由 10 多个传感器节点组成体积较小的装备，安装在士兵的头盔上，实现移动式的枪声定位。该系统典型的有美军研制的 NEST 反狙击手声源定位系统，是基于安装在头盔上的传感器节点而形成的枪声定位系统，包括一个用于声音探测的麦克风阵列，一个用于节点间交互的通信模块，一个用于枪声位置估算的处理模块和一个用于为自己提供方位的三维罗盘。它使用蓝牙技术与士兵的 PDA 进行通信，以及用 PDA 完成数据融合，并可同时提供与用户交互的接口。（这里要注意的是，不同传感器融合算法可以对来自一个或多个传感器节点的数据进行融合，系统能够通过融合后的数据计算弹道轨迹、距离、武器口径和类型等。）经过测试，当狙击手在距离对方 50m 处开枪时，其定位性能可以达到角度误差小于  $1^{\circ}$ ，圆半径误差小于 1m。距离 200m 开枪时，其定位性能可以达到角度误差小于  $1.5^{\circ}$ ，圆半径误差小于 3m。

尽管随着反狙击枪声定位系统的发展和批量化生产，各参战部队极大地提高了其“单兵作战”和“反恐作战”的能力。但是在现代战争中，面对装备精良、训练有素的敌方狙击手，这些反狙击枪声定位系统仍有很多缺陷和问题。首先，面对敌方的主动干扰时，这些系统往往显得力不从心，比如当狙击一方选择双方激烈交火时，会将自身隐藏于己方众多火器之中，由此增大了枪声定位系统的判断难度，甚至无法判断真正的狙击手在哪里。其次，由于现有的多数枪声定位系统装备实际上并不能做到非常精确的定位，因此也就无法达到对目标“发现即摧毁”的理想效果。最后，如果狙击手有意挑选处于我方武器射程范围外区域进行射击，并事先选择好撤退路线，一击之后立即逃之夭夭，便

大大降低被发现的概率。

结合上述问题，未来枪声定位系统的发展趋势如下所述。

### 1) 缩短探测定位时间，自动阻止危害

如何更小地缩短探测定位时间，并自动做出反应阻止危害，这是枪声定位系统发展一直追求的目标。例如，美国国防部高级研究计划署正在研制一种被称为“C 狙击手”的项目，该项目试图从静止或运动的车辆上定位隐身于混乱的城市环境中的狙击枪，并阻止它们给己方造成危害。

### 2) 综合集成各种探测手段，提高定位精度和广度

将声、红外和激光等多种探测手段有机集成与结合，不断提高探测和定位的精度和广度。例如，美国研制的 PD-Cue 射弹探测定位系统，就正在考虑增加一台红外传感器设备。

### 3) 微型化、低功耗和低成本

随着微电子、新材料和通信技术的进一步发展，以无线传感器网络为基础的枪声定位系统，必定会更加微型化、低功耗和制造低成本，以有利于大规模传感器节点的布撒，从而最大限度地发挥大量节点协同探测信息的优势，同时以低功耗保证传感器节点长时间工作。

## 8.3.2 战场目标定位跟踪系统

无线传感器网络的研究最早起源于军事领域，以其具有的微型化终端探测能力及自组网的特点，在战场目标定位跟踪应用中显现出越来越明显的优势。例如，美国国防部高级研究计划署曾立项 Sensor IT 项目，该项目通过实验，将大量传感器节点通过飞机布撒在需要监测的区域中，利用节点自身的传感器实现对坦克、人员等机动目标的定位跟踪，根据结果绘制其移动的轨迹，从而证实无线传感器网络对战场目标进行定位跟踪具有比较大的可行性和优势。该项目的实施引起了世界各国的关注，并开始广泛研究基于无线传感器网络的目标定位跟踪系统。

通常，目标定位跟踪技术可以划分为四类：一个探测器跟踪一个目标、一个探测器跟踪多个目标、多个探测器跟踪一个目标及多个探测器跟踪多个目标。对基于无线传感器网络的战场目标定位跟踪系统而言，由于受传感器节点信息处理、数据通信和能量储备的限制，比较合适的是采用多个探测器即多个传感器节点跟踪一个目标。因此，基于无线传感器网络的目标跟踪系统是通过无线传感器网络的传感器节点之间的协作，来对目标进行定位和掌握目标的速度、位置及移动轨迹等信息。

目前，在基于无线传感器网络目标定位跟踪系统中，比较常用的是二元感知节点模型，即将传感器感知信息转化为是否发现目标的离散二元值（1 或 0）。例如，如果目标

与传感器的距离小于传感器的感知半径，则传感器的读数为 1，即表示发现目标；否则，传感器读数为 0，表示未发现目标。然后，传感器节点将二元感知信息发送给定位跟踪融合中心，对目标位置和轨迹进行估计。由于传感器节点只需要将二元感知信息传送给融合中心，因此可以大幅度降低网络的数据通信量，并降低传感器节点的复杂性，使其更为简单和廉价，更有利于大规模部署。

二元感知节点工作模型如图 8-9 所示，其中虚线圆圈表示传感器节点的感知区域，当目标进入传感器节点的感知区域时，即当传感器节点接收到强度高于预设阈值的信号时，传感器节点将向融合中心发送二元信息值“1”，表示自己检测到目标对象。例如， $t_2$  时刻，状态变量  $s_2 = 1$ ；否则，该传感器节点不作任何反应。

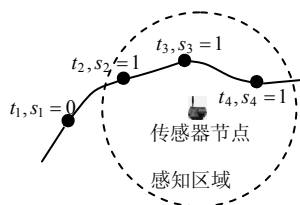


图 8-9 二元感知节点工作模型

在实际应用中，存在磁阻传感器、震动传感器、声响传感器等多种二元感知传感器，而二元感知节点工作模型也是比较符合实际传感器特性的，当机动目标在一定范围内接近它们时，会产生一个明显的信号变化，即表明一个目标的出现和存在。当然，战场环境中复杂的噪声也会引起传感器的误报，为了消除这种误报，需要对传感器设置一个阈值以降低由于信号噪声引起的误报。阈值的选择需要结合传感器特性进行，既要保证二元探测的可靠性和稳定性，也要保证探测定位系统的漏警率不会太高。

基于二元感知系统模型的质心定位系统如图 8-10 所示，其中无线传感器网络由  $s_1 \sim s_7$  7 个传感器节点组成，从虚线圆圈表示的传感器节点的感知范围可知，实现了对目标区域的覆盖与监测，图中五角星表示对被跟踪目标的位置估计，五角星之间的连线形成机动目标的运行轨迹。整个系统工作原理是：当被跟踪目标沿箭头曲线从目标区域通过时，传感器节点对目标进行探测，相邻节点间通过交换节点位置、目标出现时间（在其最大探测范围内出现的时间）等信息来实现对被跟踪目标位置的估计，然后利用分段线性拟合算法估计目标的运动轨迹。该技术的优点是速度快、能耗低，但目标跟踪的精度相对较低。

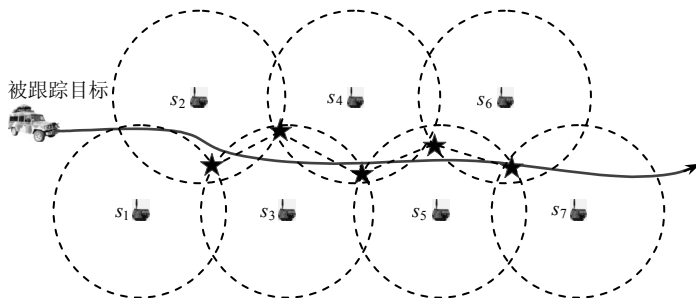


图 8-10 基于二元感知定位模型的质心定位系统

目前, 基于二元感知定位模型的跟踪定位系统主要采用两种方法: 一种是 CTBD (Cooperative tracking with binary-detection) 方法, 另一种 BPS (Binary Proximity Sensors) 方法。下面对这两种方法进行重点介绍。

### 1. CTBD 方法

CTBD 方法主要针对传感器节点感应信息单一的特点, 采用二进制探测机制配合时间运算的目标跟踪方法, 该方法并不要求传感器节点具有检测自身与目标间距离的能力, 只需要确定目标何时被某传感器节点发现、何时逃离该传感器节点的感应范围。

该方法的基本思想包含四个主要部分: ① 各个传感器节点探测目标经过其感应范围的时间; ② 相邻探测传感器节点交换目标经过的时间和位置信息; ③ 采用加权质心算法确定目标位置; ④ 分段曲线拟合估计目标轨迹。

由于 CTBD 方法在进行路径计算的时候是基于时间与空间分离的探测信号, 因此预测目标位置精度和拟合目标轨迹路径精度还是比较理想的。同时该方法在进行位置估计和路径拟合的过程中, 还可根据需要合理调整需要进行线性拟合的位置数目, 以便达到实时性好、精度高的要求。例如, 该方法利用动态策略, 针对实时性要求比较高的应用, 采用较少的点进行线路估计来减少计算量, 从而有效降低了无线传感器网络的能量消耗。

### 2. BPS 方法

在 CTBD 方法的基础上, 研究者又提出了另外一种基于二进制探测的目标定位跟踪方法, 即 BPS 方法。在 BPS 方法中, 仍然采用 CTBD 的网络构架, 但是每个传感器节点采用 1b 信息来描述目标是否存在于其探测区域内。

BPS 定位跟踪方法假设运动目标可以任意改变速度和方向, 为了提高精度和降低计算复杂度, 该方法采用分段线性逼近进行拟合的方法并给出目标的运动轨迹。其基本原理是: 系统将网络中的传感器节点分为探测传感器节点和定位跟踪传感器节点两类。其中探测传感器节点仅完成目标信息收集工作, 定位跟踪传感器节点辅助目标有关参数的计算工作, 在进行跟踪轨迹估计计算时, 通过假设在相对小的滑动时间窗口内, 将目标在该时间窗口内的运动看做匀速运动, 并在此基础上拓展研究。

根据 BPS 方法的特点, 可知跟踪性能可以由一个权值所控制, 该权值直接决定路径拟合的时间窗口大小, 不同的权值可构建不同定位跟踪精度所需求的无线传感器网络定位跟踪系统。

目前, 无线传感器网络目标定位与跟踪技术的研究主要集中在单目标定位跟踪领域, 并且已经取得了一定的研究成果, 包括一些集中式定位跟踪算法、分布式定位跟踪算法、以节点为中心的定位跟踪算法和以位置为中心的定位跟踪算法等。但是总体而言, 目标跟踪对于无线传感器网络来说是一个新兴的应用领域, 仍需对以下四个方面问题进行更深入的研究。

### 1) 对有效测距方法的研究

目标定位的精度和目标与节点间距离测量的准确度之间具有密切的关系。目前,传感器网络中的四种测距方法(RSSI、TOA、TDOA和AOA方法)均不能满足应用要求,从而导致目标定位和跟踪精度无法达到战场精确感知的应用需求。因此,研究和开发更加适合无线传感器网络应用需求的距离测量方法将是一个非常有前景的发展方向,特别是研究具有良好的抗干扰能力和对障碍物穿透能力的精确测距技术。

### 2) 对混合定位技术和跟踪融合技术的研究

每一种定位技术都有其优/缺点,仅依靠一种定位技术不可能适用于所有的通信环境并满足定位要求。因此,如何采用恰当的混合定位技术,充分利用各种定位技术的优势是一个重要的研究方向。另外,机动目标跟踪涉及多个传感器节点间的协同、数据关联、滤波预测和融合估计等复杂运算,但是传感器节点自身计算能力和存储能量受限,导致传统的目标跟踪融合算法并不能应用于无线传感器网络目标跟踪系统,因此研究和发展分布式、低复杂度、高鲁棒性的跟踪融合技术也将是未来研究的一个重点方向。

### 3) 对多目标定位跟踪方法的研究

在目标定位与跟踪过程中,经常会出现多目标的情况,在无线传感器网络中如何对多目标进行定位和跟踪,将是未来战场目标定位与跟踪系统发展的一个重要研究方向。因此,需要借鉴传统目标跟踪系统的多目标跟踪成果,对无线传感器网络中的多目标跟踪方法开展研究,并且也可以根据无线传感器网络的特点,将新技术应用于无线传感器网络定位跟踪系统。例如,最近出现的压缩感知(Compressive Sensing, CS)理论在无线传感器网络多目标定位领域中已经得到广泛的研究,并带来多种潜在优势,如传感器节点直接采样少量样本数据完成压缩,而不需要基于奈奎斯特定理进行大量、高速的采样和额外运行复杂的压缩算法,由此也将有效降低每个传感器节点的通信能耗和通信带宽需求,使得传感器节点变得简单廉价。因此,研究和开发适应于无线传感器网络应用的多目标定位跟踪系统将是未来研究的一个重要方向。

### 4) 对战场应用环境的研究

目前,对无线传感器网络目标定位与跟踪系统的研究,都存在对战场应用环境理想化的假设,如监测区域中的传感器节点只要在其通信半径内就能进行通信。但是,在现实环境中,由于障碍物的存在,可能会导致传感器节点即使在通信半径内也不能直接进行通信;其次,传感器节点间的通信也可能是不对称的。因此,需要建立具有不同环境参数的战场应用环境模型,以支撑无线传感器网络定位跟踪方法的研究和仿真。

## 8.4 单兵系统应用实例

随着时代的发展,现代战争已经发展成为高科技战争,这种高科技战争不仅表现为

武器越来越先进、信息越来越发达、对参战人员的素质要求越来越高，更表现为高科技条件下的数字化和信息化以及对战场信息获取的精确度（包括对战场环境的探测，对战场士兵战斗力的探测，对敌方武器装备的探测等）。在这种新的战争模式下，士兵作战单元的概念已经产生了质的飞跃，单兵系统的作战能力高低直接决定了战场上整体战斗力的强弱。

目前，单兵系统是指单兵在战术环境中穿戴、使用和消耗的所有装备品，集于单兵一身的单兵防护、单兵战斗武器和单兵通信器材等，它包括头盔、防弹服、单兵枪械、“三防”装备（包括防护核、化学和生物武器）、计算机及电台等整体装备。单兵系统是把单兵作为整个作战系统的一个武器平台、从人-机环境整体考虑、统筹规划与设计的，可以使士兵、武器、防护装备有机结合形成一个完备、合理的体系，使得单兵能够迅速、准确地处理和传递信息，为上级了解和掌握战场态势和准确判断战场形势提供可靠依据。可以说，单兵系统是实现战场一体化的客观要求，未来数字化战场要求各功能单元、直至单兵都通过战场综合通信和信息网络构成一体，使各功能领域之间更好地协调和相互支持，而单兵系统将能够有效支撑战场一体化的实现。

装备单兵系统的士兵可以在复杂战场情况下，特别是在一些机动重武器难以到达的特殊作战条件下，获得准确、直接、不断更新的战场信息。单兵系统使任何一个士兵成为战场上的侦察兵，实现了全方位的情报侦察，同时还能随时告知自身所处的位置，帮助其判定敌方目标位置。正是由于单兵系统所带来的信息灵且传递快等优势，使得士兵对战场形势的判断更加准确，全面提高了其反应速度。

在未来数字化战场条件下，装备单兵系统的士兵不再是一个孤立的人，而是战场信息网中的一个节点、一个终端，从而使士兵具有强大的战斗力和全面的防护能力，以及与作战系统更大的互通性和协同能力。可以说，单兵系统是未来数字化战场不可缺少的重要组成部分。

### 8.4.1 单兵作战系统

“陆地勇士”系统是美军研制的、应用比较成功的单兵作战系统。该系统是美军在士兵脱离战车等装备后，根据地面作战需求而研制开发的，其目标是利用传感器技术和微电子技术，将“士兵系统”作为一个节点纳入战场信息网之中，将士兵从战场武器操纵者逐渐转变为综合武器系统的核心，通过信息技术来全面提高士兵杀伤力、生存性、灵活性和目标捕获能力。

“陆地勇士”系统主要包括武器子系统、综合头盔子系统、计算机/无线电子系统、软件子系统及防护服与单兵设备子系统五个子系统。该系统与单兵进行了一体化整合，极大提高了士兵的态势感知能力。“陆地勇士”系统组成如图 8-11 所示。



图 8-11 “陆地勇士”系统组成

## 1. 武器子系统

武器子系统包括激光测距仪、数字罗盘、有线武器接口/无线武器接口、视频摄像机、模块化武器系统、热成像武器瞄准器、近战光学瞄准镜、红外激光瞄准器和其他现有武器等。其中激光测距仪和数字罗盘可以为士兵提供距离和方向信息，当战斗呼叫开始时，士兵可以结合全球定位系统 GPS，获得精确的目标位置。其部分装备具体性能介绍如下：

- (1) 视频摄像机用于武器发射后显示命中情况，显示图像有 370 线高分辨率。
- (2) 热成像武器瞄准器可用于步枪昼夜瞄准，图像通过固定于头盔上的显示器显示。
- (3) 近战光学瞄准镜是无视差的红点瞄具，可用来瞄准与射击。
- (4) 红外激光瞄准器可以瞄准距离达 600m 的目标，而且可从固定在头盔上的夜视探测器的显示器看到。

## 2. 综合头盔子系统

综合头盔子系统的核心是安装在头盔上的头盔显示器、图像增强/视频放大装置、激光探测器、防化学/生物面罩、防弹/防激光护目装置和头部方向传感器等。综合头盔子系统可以作为士兵与数字化战场上其他系统的接口，可为士兵提供防弹功能和高保真视觉与声觉的战场信息，并且可以在白天、黑夜及核、生、化环境下使用。士兵通过头盔上

的热成像传感器可以扫描战场某一区域,及时获得地形特性和隐蔽敌人的位置,为火力打击提供准确情报信息,同时士兵还可以通过综合头盔系统实现发送信息,请求目标区域映像,请求火力打击支援等功能。

### 3. 计算机/无线电子系统

计算机/无线电子系统是“陆地勇士”系统的核心,该系统集指挥、控制、通信和计算为一体,融合了计算机信息处理机、无线电收/发装置和全球定位系统,可实现战场信息的采集、传输、处理、显示和决策及控制等功能。该子系统基于开放式结构设计,与“陆地勇士”系统中所有的电子装置相连,具有捕获及传输静态画面的能力;与激光测距仪/数字罗盘相连,能够提出半自动间接火力支援的要求。

计算机采用“奔腾”75MHz处理器,32MB随机存取存储器,340MB硬盘驱动器和85MB快擦写存储系统,具有模块化可升级体系结构。计算机重1.125kg,体积为10.6×7.0×1.7立方英寸(1立方英寸=16.3871cm<sup>3</sup>),可以获得来自“陆地勇士”传感器的单帧视频影像或热像,并将其压缩,以便传送。通信电台以商用个人无线通信技术为基础,提供3级加密数据的传输技术,为徒步士兵提供组内自组无线通信功能,使单兵可以连入战术互联网。

### 4. 软件子系统

软件子系统包括战术软件和任务支援软件,这些软件通过灵活的用户界面使单兵系统与数字化C<sup>4</sup>I系统连网,大大提高了士兵执行任务的效率和作战能力。其中,战术软件的核心功能是了解作战环境(定位/导航、数字地图显示、位置数据、激光探测和报警)、指挥与控制信息(指挥与控制信息、图表显示处理信息)和火力计划与控制信息(部队火力计划、粗略的防护雷区、火力探测控制界面)。此外还包括通信管理、装备管理、工作站管理、数据服务、显示管理/用户界面、任务支援及训练管理等功能。

### 5. 防护服与单兵设备子系统

防护服和单兵设备子系统包括先进的载体、模块化防弹背心、防化学/生物衣服、手套、靴子及其他现有衣服和单人装备。其目标是实现快速重组,适应不同使命的需要,以方便计算机及电台部件迅速、快捷地替换。同时该子系统采用模块化设计,便于各部件功能及材料的改进。

2007年8月,美国陆军对外界公开了新型“陆地勇士”单兵系统,并于2008年在伊拉克进行了实战部署。总体来看,该系统利用多种传感器设备和无线通信手段,不仅拥有了强大的火力和防护能力,还具有空前的网络战能力,能够实时向士兵提供作战区域的详细地图、自己和战友所处的位置、指挥部最新命令和最新敌情通报等战场信息,可以全面提高士兵的攻击力、生存力和目标捕获能力。



除美国外,其他国家如法国、英国、德国、俄罗斯和以色列等国也相继开展了单兵作战系统的研究。其中,法国陆军参谋部提出先进战斗士兵系统计划,并由地面武器工业集团和汤姆逊公司分别承担研究徒步作战装备全套演示系统,该系统将无线电通信、定位、导航、夜视、敌我识别、态势显示以及人体状况监测等功能集成在一起,通过数字、图像或语音形式进行显示。英国针对单兵系统提出“未来战斗士兵系统”计划和后来的“未来士兵技术”计划,提出研制带防毒面具功能的“智能头盔”,通过加装陀螺稳定激光指示器、图像增强器、热成像摄像机及显示系统,使士兵耳聪目明,并自动实现信息传递、观测瞄准和优化射击功能,全面提高了战场单兵作战的能力。

纵观国外单兵作战系统的信息化发展,其重点主要体现在三个方面。

一是系统集成化。单兵作战系统在提高作战效能的同时也会增大士兵负荷,由此需要对单兵信息化系统进行有效集成,即以信息技术为纽带,将计算机、显示器、通信与导航装置、用户接口等子系统集成发展成更加集成化的单兵系统,以战术无线网络为依托,将通信、侦察感知、定位导航等功能集成。例如,美国“陆地勇士”系统的后续系统奈特勇士系统,将战场侦察与打击毁伤武器集成发展成侦察/打击一体的单兵巡飞弹;将态势感知、显示与防护等集成发展成综合头盔系统;将防护服、单兵电源、可穿戴外骨骼,甚至是嵌入作战服的微型传感器进行集成等。

二是功能多样化。单兵作战系统已发展成包括单兵电台、智能终端、枪支弹药,甚至单兵巡飞弹等多种装备在内的、具有多种功能的武器系统,特别是“奈特勇士”系统采用开放式结构设计,集探测感知、指挥控制和防护,甚至打击毁伤等功能于一体。未来士兵系统还将通过计算机接入认知网络,使士兵具有认知网络通信、实时信息感知、信息管理和全方位防护等强大功能。

三是装备智能化,作战网络化。数字化单兵作战系统将嵌入各种传感器,并通过智能手机及战术无线网络与任务指挥系统连接,最终实现装备智能化和作战网络化。

可以预见,未来信息化战争更依赖于战场信息网络。单兵作为战场信息网络中的一个节点和终端,其作战任务和作战方式有了很大不同,以单兵作战系统为依托,单兵将成为以数字化信息为基础、以计算机系统为支撑的战场信息网络的神经末梢,并演变为一个信息化作战平台。

#### 8.4.2 单兵生命体征监测系统

随着生物传感器技术的迅猛发展和日益广泛的应用,生物传感器技术被越来越多地用于对军事人员生命状态参数的监测,一些发达国家军队更是积极利用此类技术,不断研制基于传感器技术的各种穿戴式单兵生命体征监测装备,及时掌握士兵血氧饱和度、呼吸、体温以及脉率等系列生理状态,为及时掌握士兵是否紧张、是否疲劳、是否受伤

等提供支持,同时如果士兵在战场上受伤,救护人员可在找到他之前就可以设计医疗方案并给予救护指导,使伤员在尽可能短的时间内得到救治,避免失去救治时机而造成不必要的伤亡。可见,单兵生命体征监测系统全面提升了部队战斗力并增强了对战场作战人员的救护服务能力。

单兵生命体征监测系统通过集成无线通信模块、生物传感器模块、计算存储模块和电源模块,对士兵生命体征如体温、脉搏、血压、呼吸、承受压力的情况、睡眠情况、身体姿态和所承受的工作强度等信息进行数据采集,并将采集到的信息通过无线通信方式传输到基站,然后通过卫星通信系统将士兵状况报告给指挥人员和医务人员。利用这些信息指挥人员可迅速判断出前线作战士兵的生理状态,如是否受伤,伤情如何,是否处于疲劳、寒冷、疾病和恐惧等不良状态之中,同时为伤病员的及时救护和给养提供了客观依据,有效提高了指挥人员对战场上士兵战斗力的判断和决策指挥能力,以及单兵在野外战场上的生存能力。

下面将从现有监测装备种类、现有监测传感器类型和典型单兵生命特征监测系统三个方面对单兵生命体征监测系统进行介绍,为无线传感器网络在单兵生命监测领域的应用提供支撑。

### 1. 现有监测装备种类

根据监测装备的组成形式,现有单兵生命体征监测装备大致有衣物式、腕表式、指套式、指环式和其他类型。

(1) 衣物式,主要通过一件或几件集成有生理参数传感器和数据线的衣物来实现对人体生命状态的监测。此类装备具有便携性和穿戴的舒适性,并较小影响作战人员进行各种战术动作。典型的有美国乔治亚理工学院研制的智慧衫,该衫中集成了大量光纤线路,由外围部署的传感器完成对多种生理信号的采集,并能通过传感装置监测作战人员是否中弹。类似装备有意大利 2005 年发布的“可穿戴系统”,其外观和质感与普通衣物几乎没有区别,衣内集成了包括心电电极、压力传感器等设备,经与外围数据处理设备的配合,对穿戴者心电、呼吸信号进行采集和处理。

(2) 腕表式。腕表式监测装备由于体积小、重量轻、佩戴与使用方便而广受欢迎,其典型的有 Empirical Technologies 公司推出的具有无线通信功能的腕表式心率、呼吸监测装备,该装备能够方便佩戴在人体手腕,可用于战场监测单兵脉搏和呼吸频率。

(3) 指套式。通过在单兵指尖捆绑光电传感器,以测量血氧含量。典型的有美国海军医疗研究中心研制的无线生命体征监护系统(Wireless Vital Signs System, WVS)。它的缺点是对人员手部运动和灵活性影响较大。

(4) 指环式。目前,香港中文大学正在研制指环式传感器,希望通过佩戴在手指上的指环实现一些生理参数的测量,如血氧和体温等。

(5) 其他类型, 如美国陆军 2009 年研制的战场无线生命监视系统, 利用作战人员必备的头盔作为置入传感器的载体, 通过感受外来冲击信号, 监视单兵头部中弹或受到其他重力打击等的情况, 以判断单兵的生命状态。

可见, 现有单兵生命状态监测装备主要用于对战场一线战士生命体征状态进行实时和远程监测, 监测内容通常包括心率、心电、呼吸和体温等重要生命体征数据, 表 8-1 列出了部分国家单兵体征状态测量指标。

表 8-1 部分国家单兵体征状态测量指标

部分国家	所测生理参数	所得生理指标	监测装备类别
美国	心电、血压、脑电和体温	心率、血压、代谢率和疲倦度	佩戴式、腕表式和衣物式
英国	热量和体温	紧张程度、热量状态和睡眠	腕表式和衣物式
俄罗斯	心电	心率	衣物式
新加坡	脉搏和血压	脉率、血压和精神状况	腕表式

生命体征数据是由传感器采集生理信号, 再经处理而获得, 通常利用无线通信方式传输给视距外的监视点使用。当人员出现伤情时, 可根据监测装置反映的数据判断当前士兵生命状态, 及时组织并采取救援措施, 缩短作战人员从受伤到接受救治的时间, 降低作战人员的死亡率。此外, 一些监测装备已经将功能扩展到对生命体征数据分析和挖掘利用上了, 如美军正在采用数据挖掘等技术对战时采集到的人员生理参数进行分析研究, 以确定哪些数据在战时急救过程中具有价值与意义, 并根据这些数据来修正和改进以往由经验设计的战伤救治方案。

2. 现有监测传感器类型

传感器是发展单兵生命状态监测装备的基础, 由于应用场合的特殊性, 战场专用传感器在耐用性、适用性、防水性、灵敏度、功耗和体积等方面都有一定的要求。现有监测传感器, 根据采集生理信号的不同, 可用于单兵生命状态监测装备的主要有以下四类。

(1) 生理电信号获取传感器, 主要用于对心电信号和呼吸信号的采集, 此类传感器十分成熟, 在临床医疗中已得到普遍应用, 但用于作战人员则表现出新的特点, 主要是对可穿戴式技术在应用上的突破, 同时需要解决对穿戴者有可能造成的生理负担。

(2) 压电信号获取传感器, 主要用于对脉搏和血压信号的采集, 此类型传感器具有体积小、无源无功耗、信号获取方便等特点, 十分适合单兵生命状态监测装备的应用。

(3) 光电信号获取传感器, 主要用于对血氧信号的采集, 此类型传感器需要采用特殊的监测方式, 如指套式来完成信号的采集, 对野战运动中的士兵影响较大。

(4) 声信号获取传感器, 主要用于对人体外界冲击信号的采集, 此类传感器灵敏度较高, 但是易受战场环境的影响, 在抗干扰方面存在问题。

单兵生命特征监测系统的应用场景比较特殊, 传感器往往工作在较恶劣的环境中,

如高温、低温、剧烈运动和电磁干扰等环境，因此需要研制和开发适用性更强，抗干扰能力更强，耐用性更好，灵敏度更高和体积功耗更低的监测传感器，以满足单兵生命体征监测系统的需求。

### 3. 典型单兵生命特征监测系统

近年来，随着传感器技术的迅猛发展和日益广泛的应用，一些发达国家积极研制基于传感器技术的各种穿戴式新型单兵生命体征监测系统，以提升部队战斗力并增强对战场作战人员的救护能力。例如，美国从 20 世纪 80 年代起，就开始资助了多个单兵生命状态监测项目，开发出了一系列相关的传感器和应用平台。从 1996 年，美国就开始研制一种穿戴式多生理参数采集、处理的监护装备——智慧衫；随即开始研制具有无线通信功能的腕表式心率、呼吸监测装备；到 2002 年，美国陆军提出了最著名的单兵生命体征监测（Warfighter Physiologic Status Monitoring, WPSM）系统。该系统是美国“未来部队勇士”装备中的一部分，它集 ZigBee 无线网络模块与生物传感模块为一体，可以对生命体征进行数据采集，同时当士兵受伤或极度疲劳时，信息以 ZigBee 方式传输至主协调器，通过单兵卫星通信系统将士兵状况报告给指挥官和医务兵。

WPSM 系统首先通过监测士兵的生命体征来减少战斗中的疾病和伤亡，为战场救护提供有用的信息，便于制定救治计划和救治方案；其次通过对士兵的体温、心率及呼吸等指标的监测来预判士兵的身体状况；最后向指挥官提供所有士兵情况的简单报告，方便指挥官进行人员调遣和行动的安排。为此，WPSM 系统将士兵状态分为四种，分别用四种颜色表示：正常状态，用绿色表示；需要关注，用黄色表示；需要紧急救治，用红色表示；生命不存在，用蓝色表示。另外，用蓝色也表示信号传输故障。

WPSM 系统根据使用功能大体分为六大部分，如图 8-12 所示。



图 8-12 WPSM 系统构成图

其中，生命信息中心是单兵生命体特征监测系统的中心节点，负责将全身所有传感

器构建成为小型无线传感器网络,接收全身各传感器发送的生命信号并进行计算处理。所有传感器都由电池供电,采用 ZigBee 无线传输,各传感器与生命信息中心采用分时段被动式通信方式,即每个传感器将自身的唯一 ID 和时钟信息发送给生命信息中心,由该中心记录每个传感器节点 ID,并进行时间同步,随后生命信息中心可进入休眠状态。当生命信息中心需要获取某一生命特征数据时,可以唤醒相应的传感器进行探测,并与传感器建立通信链路进行数据传输。分时段被动式通信方法不仅可以有效避免各个传感器与生命信息中心之间的通信冲突,还同时节省了各个传感器和生命信息中心能量消耗。同时,每个士兵的生命体征监测系统具有唯一识别码,具有良好的抗干扰性,以保证当士兵相互接近时不会产生系统冲突。

药丸式体内温度计是一个藏于体内的温度计药丸,它可以实时监测士兵体内温度,并通过无线通信的方式向生命信息中心发送数据。

呼吸探测器主要通过检测士兵气体吸入量来监测士兵的体能状况和其消耗情况。

生理信号探测器主要负责对多种生命体征探测,它可以记录士兵的心率和体表温度,以及士兵的活动状态,当士兵不幸中弹时,它可以通过探测子弹击中人体时发出的声音信号进行报警提示。

手表式睡眠质量检测仪主要监测士兵的睡眠情况和睡眠质量,并提供相应的数据分析能力。

背部安防 GPS 系统提供准确的定位服务,方便对伤兵的查找和营救。

可见, WPSM 系统其实是以各种生命体征探测传感器为节点建立的小型无线传感器网络,整个网络以数据为中心,将各个传感器视为感知数据源,通过无线传输方式将士兵生命体征信息进行收集和汇聚,并通过中心计算的方式对感知信息进行处理,以实现单兵生命体征信息的全面管理和应用。

从美国 WPSM 系统可以看出,未来单兵生命体征监测系统在设计和研制过程中,需要重点考虑安全可靠、保密性和抗干扰、便携智能化、低功耗和低成本、数据传输和通信能力的统一,以及数据挖掘技术六个方面。

#### 1) 安全可靠

由于士兵作战条件的不可预测性,在设计单兵生命体征监测系统时,需要考虑到在野战运动等特殊恶劣环境中的应用,保证监测传感器在耐用性、适用性、防水性、灵敏度、功耗和体积等方面具有较好的性能。

#### 2) 保密性和抗干扰

现代化的战争是信息化的战争,由于高科技含量不断增加,对于采用无线通信方式进行数据传输的单兵生命体征监测系统,必须注意保密工作,以免使敌方目标获取我方单兵生命体征关键数据。同时,在野战运动过程中,随时会遇到各种电磁和声音等干扰

信号, 因此需要较好的抗干扰性能以保证系统的可靠性。

### 3) 便携智能化

由于战场特殊环境以及使用者的特殊身份, 单兵生命体征监测系统要求实用、便携, 操作简单, 具有一定的智能性。其中, 智能性不但体现在硬件的操作方便性和操作出错冗余性上, 还体现在软件的友好性上。

### 4) 低功耗和低成本

可以将单兵生命体征监测系统看做是一个小型无线传感器网络, 它完全依靠电池供电, 因此单兵生命体征监测系统必须考虑到供电功耗, 要首选低功耗的元器件。同时系统成本过高也不符合军事实际应用需求, 因此低成本设计也是必须要考虑的问题。

### 5) 数据传输和通信能力的统一

目前的数据传输方案有多种, 不同国家甚至不同单位的数据传输形式都不同, 这给不同系统间的通信带来极大的不便, 在未来的发展中应当着力于制定一些通用的数据传输或通信标准。

### 6) 数据挖掘技术

面对战场上产生的海量生理数据, 未来单兵生命体征监测装备应当在数据库技术、数据挖掘技术等方面进行改进, 从采集到的数据中挖掘出有意义的信息, 为战场救护、组织指挥等提供信息支撑。

## 8.5 其他领域应用实例

无线传感器网络具有可快速部署、自组织、隐蔽性强和高容错性等特点, 被广泛应用于军事领域。本节重点介绍无线传感器网络在智能武器、军事训练和目标毁伤效果评估等领域的应用, 以促进无线传感器网络向更深层次军事应用发展。

### 8.5.1 智能武器

智能化武器将成为未来战场的主角, 无线传感器网络技术的发展和成熟, 为智能武器的发展提供了技术支撑。例如, 利用各种内嵌或外连的传感器和感知控制网络, 武器系统可对战场信息进行智能化采集、加工、处理和分析, 自主地提炼有效信息, 随时获取己方坐标、战场态势和敌方威胁等信息, 并及时做出响应, 提高武器系统打击的速度和精确度。其中典型的代表有智能地雷、精确制导导弹和无人机等。下面以智能地雷为例, 介绍无线传感器网络在智能武器方面的应用。

过去 20 年, 在传感器技术和无线通信等新型技术的推动下, 智能地雷技术得到了蓬勃发展, 其功能在不断完善, 性能也在稳步提高。目前来看, 地雷已经不是在以前那种对付地面目标的一种防御性、被动性的杀伤武器, 而是向着防御和进攻方向发展的攻防

兼备的主动武器。无线传感器网络技术的应用,使地雷克服了原来“守株待兔”的模式,开始向智能化方向发展,现在,智能地雷不仅长了“耳朵”、“眼睛”和“大脑”,而且还插上了翅膀,可以腾空而起,能够主动、准确地探测跟踪坦克、装甲战车和直升机目标并实施攻击。

总体来看,与传统地雷相比,智能地雷结合了传感器探测技术、无源定位技术和无线通信技术等,通过传感器阵列主动探测目标信息,并进行目标类型识别和精确定位,根据探测信息实施主动攻击,实现了“发现—定位—打击”一体化。与传统地雷相比,智能地雷具有如下主要五种功能或特点。

(1) 具有主动探测功能,能够在数千米之外主动探测敌军的到来,判断其规模和性质,及时使雷场进入戒备状态,并将战场信息传输给指挥中心和相关作战部队。

(2) 具有敌我识别功能。智能地雷通过探测信息可识别敌我目标,有效避免对友军造成误伤。

(3) 具有远程控制功能,能够遥控雷场的战斗转换,保障己方部队安全通过;或者对敌人完全进入前保持静默,当完全进入后再转入战斗状态,以达到最大杀伤和阻滞效果。

(4) 具有火力自动分配功能,能够自动分配地雷攻击火力,在群目标中选择最佳攻击对象,避免重复攻击。

(5) 具有自主确定最佳攻击时机的功能,通过组网使地雷系统可根据探测信息自主选择 and 确定最佳攻击时机,以击毁几百米以外目标,击毁效果可提高 30~60 倍。

目前来看,智能地雷主要用于反击武装直升机和坦克等进攻性武器,通过人工布设或借助于飞机等进行自动布撒,然后组网,形成覆盖目标区域的地雷场,智能地雷可自动探测、识别并实现对目标的定位、攻击和毁伤,并具有协同作战的能力。智能地雷系统的组成如图 8-13 所示。

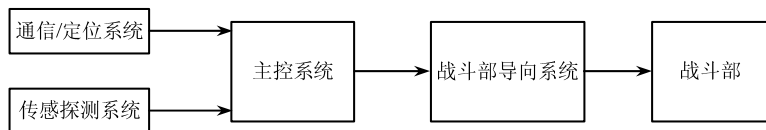


图 8-13 智能地雷系统的组成

通信/定位系统主要采用无线传感器网络技术,可实现地雷间随机布撒的拓扑网络生成、时间同步、节点定位及网络通信等功能,形成无线智能地雷网络系统。

传感探测系统主要采用各类传感器,如声音、震动、红外、激光和雷达等传感器,对入侵目标进行探测,具有全天候和无人值守的工作能力。

主控系统是智能地雷的核心部分,主要对传感探测系统输入的目标信息及周围智能地雷传送的目标信息进行融合处理,实现对入侵目标的分类识别和航迹跟踪,并进行决策判断。

战斗部导向系统主要负责智能地雷攻击时的导航,利用声红外组合制导或其他导航方式对智能地雷的战斗部进行引导,以实现精确打击。

战斗部是智能地雷中的攻击部分,实现对入侵目标的攻击,通过自身爆破,实现对目标的摧毁。通常智能地雷可携带有多个战斗部,以实现多层次打击。

智能地雷系统的工作过程包括:① 智能地雷通过飞机或火箭空投自动布撒到目标区域,由于是自动布设,智能地雷的位置不能预先精确设定,智能地雷之间相互邻居关系预先也不知道,因此触地后接通电源,首先启动通信/定位分系统,利用无线传感器网络自组网技术进行时间同步、拓扑结构构建并定位节点,确定各个智能地雷的相对位置及其坐标系,在几秒内自主形成无线地雷网络系统。② 传感探测系统进入“无人值守”状态,当有目标入侵时,传感探测系统将采集地面或空中目标信息,并将各个智能地雷采集到的目标信息汇聚到主控系统。③ 主控系统对入侵目标信息进行处理,如提取目标声音,震动信号的时域和频域特征,并与本地存储的目标特征库进行比对,实现对目标属性和类型的判别,以及对敌我目标的区分和识别。④ 在目标识别的基础上,基于随机分布式传感网的测向定位机制与简单快速定位跟踪算法,利用每个智能地雷已知的位置信息和网络拓扑结构,实现对入侵目标的精确定位和跟踪,以满足智能地雷战斗部攻击所要求的定位精度和响应速度。⑤ 战斗部与战斗部导向系统启动,基于入侵目标未来位置,调整弹药发射装置使其处于准确的发射角度,同时计算出弹药飞行轨迹与目标运行轨迹的交汇点,使弹药旋转对准目标,适时点火起爆,从而摧毁目标。

目前,美国、英国、法国和俄罗斯等世界军事强国都在利用无线传感器网络技术大力发展智能地雷,已研制成功或已投入使用的智能地雷主要有以下七种。

(1) 美国 XM-93 广域地雷,专门用来攻击坦克顶甲的一种智能反坦克地雷。该雷布设后展开八条稳定支腿和一个传感器阵列,传感器阵列由三个微音器和一个地雷探测器组成。当传感器阵列在 100m 毁伤半径内探测到坦克到来后,立即进行跟踪,并测定坦克的行进方向和速度,由微处理机计算出坦克运行轨迹,然后控制弹药发射装置处于准确的发射角度,同时计算出弹药飞行轨迹与坦克运行轨迹的交汇点,使弹药旋转对准目标,适时点火起爆,从而摧毁坦克。

(2) 美国 ERAM 远程反装甲地雷。该智能地雷为空投寻的地雷,主要用于攻击坦克顶甲,杀伤车内乘员,破坏车内设备,使坦克丧失战斗力。该地雷由发射器、音响探测器、数据处理器和两枚带红外传感器的“斯基特”自锻破片战斗部等部分组成。它的药型罩在装药起爆时,能在 100ms~150ms 被爆轰波的高压锻造成高压弹丸,弹丸飞行速度约 2750m/s。该地雷装在美空军 SUU-65/B 战术投弹箱内,离开投弹箱后自动打开降落伞,以 50m/s 的速度下降到地面上。地雷借助冲击惯性抛掉降落伞,伸出三根接收目标音响的传感器天线,探寻进入其作用范围内的目标。一旦发现目标,即自动进行识别和跟踪,



自动计算目标未来位置,发射器旋转至 $45^{\circ}$ 沿目标拦截弹道射出第一个战斗部。战斗部上的红外传感器探测、跟踪目标并引爆战斗部内的炸药。炸药爆炸形成高速弹丸,攻击坦克顶部装甲。第一个战斗部发射后,发射器自动旋转 $180^{\circ}$ ,对准第二个目标,准备发射第二个战斗部。

(3) 法国的“玛扎克”(Mazac)声控增程反装甲地雷。这是一种自动寻的攻击坦克顶甲的智能地雷,作用半径可达200m,一枚地雷的障碍面积相当于60~100枚普通地雷。该套装置由声波探测器和两个发射筒组成,装两枚地雷,可以 $360^{\circ}$ 旋转。当声波探测器探测到坦克装甲车辆行驶时的声音和震动时,数据处理系统开始鉴别目标,计算出它的预定位置并进行自动跟踪,当目标距离小于200m时,地雷被自动发射出去,地雷上装有红外探测器,并以20r/s、50m/s的速度飞行,一旦探测器捕捉到目标,即射出自锻破片子弹,子弹飞行速度为2380m/s,可击穿坦克装甲车辆的顶甲。

(4) 英、法研制的“阿杰克斯”、“阿皮拉”路旁反坦克地雷系统。该系统为自主式远程反坦克地雷系统,设置在路旁。它由“阿杰克斯”探测/火控系统和“阿皮拉”反坦克火箭筒—地雷两大部分组成,“阿杰克斯”探测/火控系统由音响和震动警戒传感器、被动红外寻的传感器和微处理机组成。该地雷系统在待发状态下,可以在路旁等候几天。当装甲车以3km/h~80km/h的时速接近地雷时,地雷能在2~200m的距离自动射出破甲弹丸,穿透700mm以上厚度的装甲。

(5) 俄罗斯研制的“节奏-20”反直升机地雷。该地雷能够飞到空中,专找武装直升机装甲薄弱部分进行攻击。该地雷能够根据音响判明直升机种类,并可以在各种气象条件下确定目标方位,当目标进入2000m范围内,反直升机地雷开始识别目标;当目标进入200m范围时,地雷就发射。该地雷操作简单,运输方便,总重12kg,可空投抛撒或布设在机场跑道附近,打击直升机以及其他飞行速度较慢的固定翼飞机。

(6) 南非的智能水平地雷。该地雷可作为路旁地雷使用,可探测100m开外的车辆而且能分辨出履带式和轮式车辆,攻击范围可达75m。其攻击过程首先通过声传感器探测目标,然后启动红外探测传感器测量和确定移动目标的方向,并对目标进行跟踪。当目标进入作用区域时,由传感器辨别目标,电子处理器确定攻击目标的最佳时机,最后对目标发起攻击。在5~75m范围内,该地雷对行驶速度为3km/h~60km/h的车辆都有破坏效果,同时在埋伏作战中,该地雷可锁定车队中的9辆车,并可选择其中任何一辆作为首选攻击对象。

(7) 最近美军研制了一种智能机动地雷,该智能机动地雷可在随机抛撒后几分钟时间内,利用配备的GPS导航系统,计算出相互间的位置,并立即自行调节相互间的位置,形成蜂窝状布局。如果接收器发生损坏或卫星信号受到干扰而失灵,该智能机动地雷还可通过其他手段如无线电定位技术等来进行位置调整。当防护区域遭到侵犯时,智能机

动地雷可单独或集体协调作出应对。爆破之后,其余未爆地雷可迅速计算出雷场内的裸露地段,设定新的埋设分布图,然后开始自主协调并自动补充空出来的地段。同时部署区域内的智能机动地雷还可以交换文本信息,及时替换因外部作用或一般性电子故障而失效的地雷。该类地雷主要借助配备的活塞式推杆和微型火箭,从一个地方跳跃或爬行到另一个地方。

目前,中国智能地雷系统的研究还处于起步阶段,在武器装备方面还是空白,不过已经有相关院校和研究机构开始对防坦克和防直升机智能地雷原理进行研究,同时对目标探测、识别与跟踪定位等关键技术进行攻关,并已获得阶段性成果,具备一定的理论和技术基础。但中国对智能地雷实用化技术的研究仍然不足,尤其是对影响智能地雷作战使用的目标识别技术和精度定位跟踪技术研究尚不够深入。

因此,在无线传感器网络技术快速发展和不断成熟的关键时期,在新军事变革迫切需求的形势下,急需加大对智能地雷的攻关力度,为有效打击敌方坦克、装甲车辆以及不易被防空雷达发现的超低空直升机提供智能武器支撑。

## 8.5.2 军事训练

未来作战,在兵力使用上的一个鲜明特点,就是敌我双方对抗强度大,攻防双方所面临的作战背景极其复杂。军事训练作为战斗力生成的根本途径,为了保证部队战斗力的稳定和提升,势必要求提高军事训练的实战性。在此背景下,世界军事强国都在寻找和研究采用新技术如无线传感器网络、虚拟现实、人工智能等构建最接近实战的训练环境和设置最贴近实战的训练方式,以快速提高士兵在信息化作战环境下的现代化作战能力。同时利用新技术构建虚拟现实环境,建立沉浸式虚拟仿真训练系统开展军事训练,利用多种传感器进行自动化训练评估,这不仅可以显著提升训练效果,还可以有效避免训练伤亡并节省训练费用。最近几年,在多次局部战争中美军创造了“零伤亡”和“零损失”的战果,也展现和证实了美军采用新技术进行军事训练的显著效果。

目前,利用各类传感器、无线通信、虚拟现实以及人工智能等新技术,美军建立了沉浸式士兵战术训练系统、沉浸式士兵武器操作训练系统及虚拟战场环境系统等,以提升其士兵训练效果。

### 1. 沉浸式士兵战术训练系统

最近,美国陆军耗资 5700 万美元研制了陆军步兵训练系统(Dismounted Soldier Training System, DSTS),该系统是近年来首个投入使用的沉浸式士兵虚拟仿真训练系统,它包括可穿戴计算机系统、人体传感器、具备光学瞄准镜的仿真武器以及触觉反馈垫等。该系统允许九名士兵同时参与训练,通过头盔显示系统观察整个虚拟战场环境和其他队员的行动。同时,士兵可根据作战任务做出相应的战术动作,如行走、下蹲和扔手榴弹,

以及遇到攻击进行战术躲避并召唤近距空中支援等。

该系统最大优点是能够提供山地、丛林和沙漠等让人身临其境的战场环境，并通过各类传感器、数据衣服、头盔显示器和数据手套等，让士兵体验逼真的作战环境，进而像参加实战一样，锻炼和提高士兵技/战术水平、快速反应能力和心理承受能力。同时该系统还可以支持各种作战任务，包括大规模作战、非常规作战、平时任务以及民事支援等，士兵可通过操纵传感装置选择不同的战场场景，练习不同的处置方案，体验不同的作战效果。也可以对士兵进行同一作战环境、同一作战任务的反复演练，以极大提高真实训练的效果。此外，DSTS 还提供多角度数字场景回放功能，训练结束后，士兵可从第三者视角或者全景视角进行回放，细致观察每个动作，总结训练中的得失，这是在真实训练中难以做到的。

## 2. 沉浸式士兵武器操作训练系统

伴随现代士兵武器系统技术的提高，真实训练产生的风险和耗费也日渐加大，因此利用各类传感器和虚拟仿真技术实现武器系统的虚拟仿真训练，已成为世界军事强国研究的热点。

美国武器制造商雷神公司基于 VBS2 (Virtual BattleSpace 2) 商业游戏引擎开发了一种士兵虚拟作战系统，该系统包括两个部分：用于游戏仿真的软件插件和用于控制软件的武器硬件，从而将武器系统的构成、功能在虚拟环境中得到真实再现，利用各类传感器将按钮、光学瞄准具、弹药发射等进行了精确复制，同时该系统还利用了头盔显示模块和运动记录传感器，将士兵按下按钮等操作信息实时传回系统，控制虚拟人物做出同样的动作。例如，以“标枪导弹模拟训练”为例，士兵可通过戴上头盔显示器和数据手套，基于将现实生活图像与虚拟敌情融为一体的虚拟战场环境，进行标枪反坦克导弹系统专项操作训练，通过反复训练以充分熟悉标枪反坦克导弹系统的操作和性能。

此外，美国空军也利用各类传感器和虚拟现实技术研制和开发了专门用于飞行员训练的模拟器，利用该模拟系统单兵不仅能以正常方式操纵和控制飞行器，还可以模拟进行视觉控制、处理三维实时交互图形和图形以外的声音和触感等信息，以及模拟训练处理飞行以外的各种情况，如气球的威胁和导弹发射等。

## 3. 虚拟战场环境系统

虚拟战场环境系统是指利用虚拟现实技术，通过多种类型传感器和计算机对获取或存储的战场要素数据，如战场地形、战场场景、战场态势、战场人员和战场武器装备等进行处理，最终显示出近似逼真的立体战场环境。它能够使使用者有一种身临实际战场的感觉，将它用于军事训练能够大大提高训练的质量。

目前，美国已经研制出一种被称为“激光沙盘”的虚拟战场环境系统，该系统由视

觉、听觉和触觉及生理反应等感知器,以及计算机、图文扫描仪、激光发射器和“沙盘”组成。图文扫描仪将收到的图片或录像等信息处理后,输入计算机,计算机对图像信息进行处理,并在其屏幕上显示出三维立体图形。然后,计算机将图像的信息送到激光发射器,激光发射器便向“沙盘”发出不同频率的激光。“沙盘”是一个空玻璃箱,箱内放有各种传感器并与计算机系统相连接,传感器可用来控制、调节箱内要素参数。当几台激光发射器按照获得的图像信号同时连续快速射击箱内空气后,一副清晰的彩色立体图像就出现了,立体图像会随着输入图像的变化而变化。激光沙盘系统能够判读和转换由卫星发回的航空照片和录像,并将图像信息转变成逼真的彩色立体地形图,将千里之外的战场环境逼真地呈现在士兵面前,基于逼真的虚拟战场环境,士兵通过各种传感器与虚拟战场环境相连接,感受虚拟战场环境中预先设定的训练内容和预案,并执行相应的作战行动,提高军事训练的沉浸感和交互性。同时不同兵种的作战人员还可以通过此系统训练协同作战能力。

除此之外,美军还利用各类传感器和虚拟现实技术训练士兵的心理能力,利用逼真的模拟战场环境使士兵产生身临其境的感受和体验,通过各类传感器使得士兵从听觉、视觉和触觉等层面完全融入虚拟系统,再利用传感器详细记录其生理和心理活动,进行针对性训练以提高士兵心理素质。同时,还可以利用该方法治疗士兵的恐高症、抑郁症等多种心理疾病。目前,美军基于心理学理论,综合运用视觉、嗅觉和触觉等多种传感器手段将士兵带入一个虚构的战场环境,通过构造战场景象来缓解士兵的心理压力,从而达到心理治疗目的。例如,模拟具有阿拉伯方言的声音向他们呼喊,模拟直升机降落或迫击炮炮弹爆炸,而后心理医生根据检测到的心跳、呼吸、体温和皮肤的温度等指导其不断调整心态,最终在心理医生的诱导下,克服各种不良心理反应。经过反复测试,美军认为该种治疗手段更容易被接受,就像一种独特的电子游戏,可以在不知不觉中实施治疗。目前,美军已经在加利福尼亚海军医疗中心、海军医院和夏威夷的美军医疗中心等,建立了基于传感器和虚拟现实技术的心理治疗场所。

目前,随着传感器微型化发展以及其性能和种类的不断完善,促使虚拟现实在军事领域中的应用范围不断扩大,应用深度不断加深,并已经由早期的针对单兵训练到排、连指挥员的模拟训练,进而发展到多军兵种作战人员的联合模拟训练。且其模拟训练的方法和设备也由原来的简单系统和平台,发展成为远程网络支持的全维虚拟现实环境。目前来看,传感器和虚拟现实技术在军事训练领域的应用发展趋势主要包括以下三个方面。

#### 1) 综合运用各类新型传感器使虚拟环境更加真实

随着传感器技术的发展,不断构建的虚拟军事训练环境将最大限度地体现沉浸感特征,使得士兵能够更加真切地融入到虚拟场景中,深刻体会到虚拟战场上各种武器装备的特征,感受到虚拟场景中各种天气特点。例如,通过修改训练参数,调整周围环境(白

天、黄昏、黑夜和月光)、海洋状态(从风平浪静到暴风骤雨)及云层厚度等来增强士兵对各种复杂条件下的作战应变能力。

### 2) 利用虚拟现实技术实现真实世界与虚拟世界的“无缝”集成

虚拟现实技术是通过计算机提供的信息增加用户对现实世界感知,将虚拟的信息应用到真实世界,并将计算机生成的虚拟物体、场景或系统提示信息叠加到真实场景中,从而实现对现实的增强。它是一种将真实世界信息与虚拟世界信息“无缝”集成的新技术,能够增强用户对现实环境的认知、理解和交互,目前已经进入军方视野。例如,美国陆军计划的未来整体训练环境就是基于这样的思想,其下属的国家仿真中心正在开发新的训练模型,运用虚拟现实技术将真实训练与虚拟仿真训练结合起来,创造无缝、混合的沉浸式虚拟现实环境,使得士兵的训练与实战无异。目前,该系统包括了大量逼真的战场空间场景,如在城市作战环境中,士兵在真实的街区执行任务,但是又可通过头盔显示器看到建筑物或者废墟后面出现的敌人或者其他情况。

### 3) 利用网络化进行分布式军事训练

网络化是现代化军事训练的另一个发展趋势,基于网络化进行分布式军事训练是指由各类传感器以及实况仿真、虚拟仿真和结构仿真共同组成的共享性训练环境。士兵可以以个体或团体的方式进行各种层次的作战训练。例如,基于网络化进行分布式飞行团队的训练,训练团队可基于战斗机仿真器、空中预警系统仿真器以及计算机生成的敌方部队等网络节点,让分布在不同物理位置的参训人员进行复杂作战情况下的训练。

基于无线传感器网络和虚拟现实技术开展沉浸式虚拟仿真训练的目的,并非要取代真实训练,而是尽可能利用技术发展,提高训练费效比,降低训练风险,从而整体提高战斗力。可以预见,随着传感器技术和虚拟现实技术的快速发展,以及其在军事领域的广泛应用,必将给未来军事训练方式带来革命性的改变,也必将对未来战争产生重大而深远的影响。

## 8.5.3 目标毁伤效果评估

目标毁伤效果评估(Battle Damage Assessment, BDA)起始于第一次世界大战,当美军空军轰炸机执行完轰炸任务后,他们几乎没有反馈任何有关目标的毁伤信息。但空军的决策者和指挥官们需要知道轰炸效果,以便制定下一步的作战计划,所以他们开始向执行任务的飞机机组人员索要轰炸任务报告,以及轰炸过程中拍摄到的目标毁伤图像,从此目标毁伤效果评估诞生。

目前,美军对目标毁伤效果评估进行了定义,即指在对既定目标进行军事打击(包括致命的和非致命的打击)后,对目标进行及时和准确的毁伤估计。目标毁伤效果评估适用于整个作战行动过程中所有类型的武器系统,包括空军、陆军、海军和特种作战力

量的武器系统。目标毁伤效果评估主要由情报部门负责,包括物理毁伤评估、功能毁伤评估和目标系统毁伤评估。

但美军目标毁伤效果评估技术的发展一直落后于武器装备发展的脚步。例如,在海湾战争中,由于高新技术武器的运用,使得落后的信息收集、处理技术及评估方法很难及时、准确地进行信息的相关收集和处理,很难满足战场指挥员对目标毁伤效果评估的需求,严重制约了美军及其盟军的各项军事行动。最近,美军为了全面提高目标毁伤效果评估能力,大力发展目标毁伤信息收集手段,构建了多手段、多平台的侦察体系,依托无人机、侦察卫星等手段进行目标毁伤信息收集。但这些手段均有各自的缺陷,如美军主要的目标毁伤信息源——军事侦察卫星,由于受卫星过境时间的限制,决策者必须将对目标的攻击时间与卫星能够覆盖整个战场的时间进行同步,因此常常导致错失良好的战机,并且侦察卫星还受到天气和地形等因素的影响;而无人侦察飞机是美军最近发展的目标毁伤信息收集手段,它相对于侦察卫星而言,更为机动灵活,但是大多时无人侦察飞机录像清晰度低,如“掠夺者”无人侦察机拍摄的图形只能供美军目标物理毁伤效果的评估使用,而不足以用于更深层次的毁伤效果评估,同时无人侦察飞机易受到敌方打击,也无法全天候对打击目标进行抵近侦查。目前,美军亟需探索和研究新的技术手段以弥补侦察卫星和无人侦察飞机的不足。

最近,随着无线传感器网络技术的发展,美军不断尝试并采用无线传感器网络和无人机的结合来丰富其目标毁伤信息收集的手段。特别是无线传感器网络,其作为一种获取情报的重要技术手段,具有快速部署、自组织、隐蔽性强和容错性高等特点,可以在很大程度上弥补传统侦察方式(如航天和航空侦察)的不足,为目标毁伤效果情报收集提供了一种新的方法。正是因为如此,目前世界军事强国都将其应用于目标毁伤效果的评估系统中。

美国陆军研究实验室利用散布在监测区域内的侦察传感器节点,形成自组织火力打击效果情报搜集网络,在火力打击之后,通过对目标的可见光、无线通信、人员部署等信息的收集和传递,将战场打击目标(诸如核心指挥区域、有机生产设施、机场、公路、建筑和部队作战力量等目标)的毁伤效果情报信息进行感知、汇聚、融合及传输,为战争后方指挥决策人员提供一个动态实时、可以不断更新的战场火力打击效果信息数据库。这种全方位、及时的目标毁伤效果情报收集也为各作战平台更准确地制定战斗行动方案提供了情报保障,同时情报人员可以根据战况快速调整和部署新的无线传感器网络,及时发现敌方的企图,以及对我方的威胁目标区域或目标分子,实现对战场的全天候严密监控,使目标毁伤效果情报的搜集产生质的飞跃。

同时,美军还将无线传感器网络应用于核、生、化武器的攻击效果评估,通过无人机将微小传感器节点部署到战场目标区域中,形成自主工作的无线传感器网络,并让其

负责采集有关核、生、化数据信息,在不耗费己方人员战斗力的条件下,及时而准确地获得目标战场上核、生、化污染信息,为参战人员制定作战计划提供支撑,以尽可能摧毁敌方和减少己方伤亡。

无线传感器网络的应用促使目标毁伤情报收集的方法、手段等发生着一系列新的变化,极大地促进了目标毁伤效果评估从“粗”到“精”,为构建“精确情报—精确指挥—精确打击—精确评估”的“四环精确链”,特别是其中的“精确评估链”提供了有效的技术支撑。随着目标毁伤效果的评估越来越受到世界各国的重视,无线传感器网络在目标毁伤效果情报收集集中的重要性也越来越显著,其作为战场信息获取的源头和途径,将以生存能力强、可靠性和准确性高及战场感知实时能力强等独特优势,在目标毁伤效果情报收集集中展示出其独特的重要性。同时,由于无线传感器网络信息安全、微型化和能耗等若干技术问题尚未解决,其在目标毁伤效果评估领域仍处于理论研究和小规模试验应用阶段,距离大规模实际应用还存在一定距离。但是,随着信息技术的发展和相关问题的不断解决,在以信息战为主要作战方式的未来战争中,无线传感器网络必将成为信息化战争中新的宠儿,必将对信息化战争产生深远的影响。

## 8.6 重要目标防护开发实例

随着技术的进步与发展,现代战争战场范围不断扩大,为指挥所、营地等军事要地提供全维不间断的安全防护监视,实时发现非法入侵目标,保护人员、设施、资源和装备免受敌特或恐怖袭击,已成为现代战争面临的一项重要挑战。目前,基于无线传感器网络构建重要目标防护系统已成为发展趋势,在此背景下,本节结合重要目标防护的军事应用需求,从开发视角详细阐述了无线传感器网络在重要目标防护领域的应用实例。

### 8.6.1 应用背景

政治、经济和军事等重要目标不仅关乎国计民生,还将对未来战争进程和结局产生重大影响。同时政治、经济和军事等重要目标或敏感目标无论在平时还是在战时都面临着多种威胁,这些目标既是战争中打击的重要对象,也是平时恐怖袭击的重要目标,而且还会受到多种自然灾害和偶然事故的严重威胁,因此对诸如战略物资中心、军事基地、战略指挥所、移动指挥所等军事目标,以及核电站、能源基地、铁路交通、水利设施、金融机构等重要政治经济目标进行安全防护显得越来越重要。

重要目标防护系统的主要目的是保护某些重要的设施、物品或者某些重要人员,防止外部人员非法入侵并对保护对象造成伤害。目前,重要目标防护系统根据探测方式的不同可以分为被动入侵探测防护系统和主动入侵探测防护系统两种类型。其中,被动式入侵探测防护系统采用被动的方式检测入侵源,抗干扰能力较强,能耗低,价格也相对

便宜, 因此其应用范围也比较广泛。但是被动式入侵探测防护系统不能进行提前预警, 完全保证受保护对象的安全, 且它做出反应时, 入侵情况已经发生, 受保护的對象已经受到了伤害。而主动入侵探测防护系统利用震动、红外、超声波和磁敏等传感器主动感知入侵目标引起的空间状态变化, 来判定是否有入侵状况发生及入侵发生的位置等, 通过主动探测外界情况, 可以实现提前预警, 有效对重要目标进行防护。

本章针对重要军事目标如战略物资中心、军事基地、战略指挥所和移动指挥所等对象, 基于无线传感器网络设计主动式重要目标防护系统, 重点以“模块化、小体积、低功耗、低成本和通用性”为目标, 开发设计嵌入式无线传感器网络节点的软/硬件系统, 使其满足重要目标防护监测任务需求的数据采集、融合计算、精确定位、抗毁重组、数据透传及视频联动探测等能力。同时为了实现重要目标防护系统工程化应用, 本节还基于两类传感器节点构建原型系统, 利用本书相关理论和算法, 进行实验验证, 以及时发现实际应用中的问题, 为后续实用奠定基础。

## 8.6.2 无线传感器网络的节点设计

为了有效集成多类传感器构建覆盖监测区域的无线传感器网络, 以实现对重要军事目标的有效防护, 本节设计了成员节点和汇聚节点两种类型的无线传感器网络节点。其中, 成员节点主要实现对光电、红外对射、震动等多种类型传感器模块的接入支持, 以及传感器数据采集和传输控制等功能, 是无线传感器网络构成中数量较多的一类节点; 汇聚节点在网络中主要实现网络的发起、路由中继和成员节点采集数据的汇集、处理和存储等功能, 在某些应用场景中, 汇聚节点还可作为网络中的网关节点, 实现外部应用系统通过其他通信网络与无线传感器网络的连接。

### 1. 成员节点的设计

为了使成员节点具有一定的通用性和可扩展性, 本节中采用了模块化的设计思想, 并依据成员节点在网络中的任务和功能需求, 设计了如图 8-14 所示的组成结构, 主要由处理模块、通信模块、能量模块、感知模块和辅助模块组成。

#### 1) 处理模块和通信模块的集成设计

考虑到成员节点微型化和低功耗的要求, 本系统对成员节点的处理模块和通信模块进行了集成设计, 采用了基于 SoC 技术的单芯片集成方案, 选用德州仪器公司的 CC2430/CC2431 作为成员节点主控芯片, 该芯片有效整合了 ZigBee 射频前端、内存和微控制器, 具有低能耗和微型化等优势。该芯片使用 1 个 8 位微控制器, 具有高达 128KB 可编程闪存和 8KB 的 RAM, 同时还包含模拟数字转换器、多个定时器、协同处理器、看门狗定时器、32kHz 晶振的休眠模式定时器、上电复位电路和掉电检测电路, 以及 21 个可编程的 I/O 引脚。



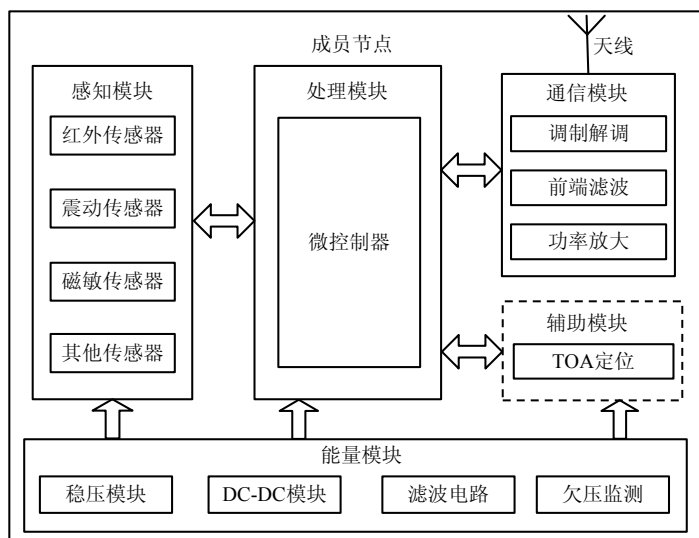


图 8-14 成员节点组成结构

基于高度集成化的 CC2430 芯片，无须设计单片机和无线通信芯片之间接口电路，只需要使用很少的外围器件就能实现复杂的射频通信功能，极大地简化了电路设计过程，有效地降低了出错风险并缩短了软/硬件开发周期。CC2430 最小核心系统的原理图如图 8-15 所示。

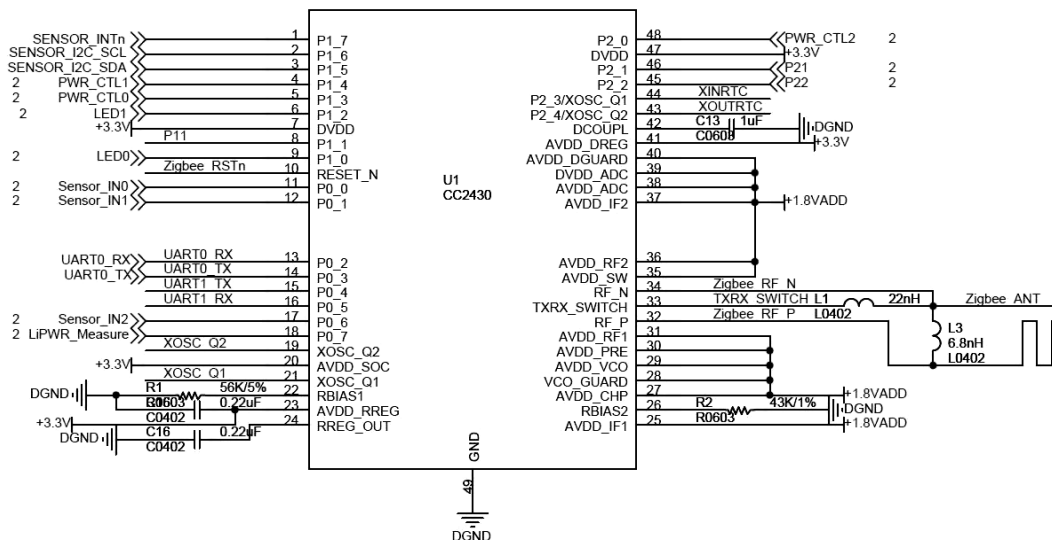


图 8-15 成员节点处理模块与通信模块原理图

在设计过程中通过标准间距的双排插座，将 CC2430 芯片可用引脚全部引出，为后期进行功能升级或其他传感器模块扩展提供了便利；芯片晶振设计采用两个时钟晶振，第一个为 32MHz，为无线收/发提供时钟；第二个为 32.068kHz，为休眠模式提供时钟；

复位电路设计由限流电阻和滤波电容组成, 实现低电平复位; 天线设计则选用成本低、辐射范围广的外置全向天线。

## 2) 能量模块的设计

基于 Zigbee 技术的成员节点具有超低功耗优势, 因此成员节点能量单元采用两节干电池作为电源供给, 同时考虑到所设计的成员节点需要对 3 路外接传感器供电, 所以选择采用 12V 锂电池组的供电方式。由于处理单元 CC2430 芯片和部分传感器需要 3.3V 和 5V 工作电压, 因此需要使用 MP2359 电压转换芯片将 12V 电压转换为 3.3V 和 5V。成员节点能量模块原理图如图 8-16 所示。

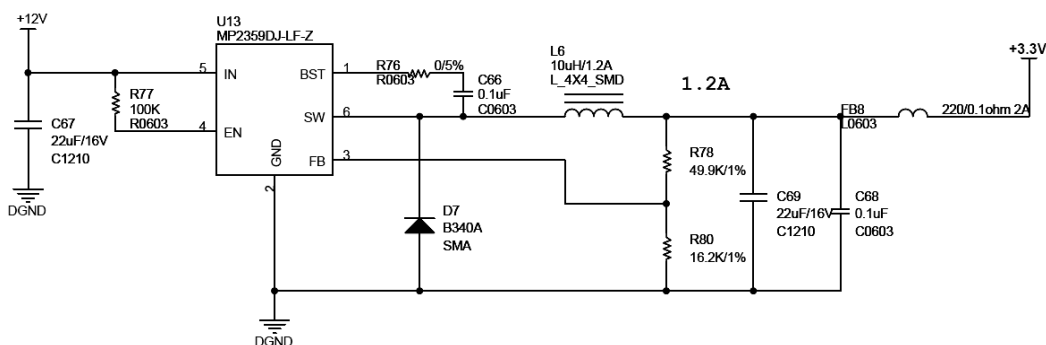


图 8-16 成员节点能量模块原理图

由于能量单元能够对外提供稳定的 12V、5V 和 3.3V 供电, 最高输出电流可达 2000mA。对于无线传感器网络而言, 能量单元的设计是其关键, 为了实现持续的能量供给, 还需要自供电单元的设计, 使能量单元能够利用太阳能、震动能等对电源进行充电, 从而实现成员节点电源单元的自供电, 因此将在后续工作中重点考虑自供电单元的设计。

## 3) 感知模块的设计

感知模块通过提供通用化的外接传感器接口, 实现红外、震动、磁敏、温度、压力、声音和图像等各类传感器的接入。同时, 感知模块还可以通过信号处理电路对原始数据进行一定的数据转换, 其组成主要包括 I/O 接口单元、A/D 转换接口单元、数字接口单元等标准化接口。成员节点感知模块的原理图如图 8-17 所示。

在设计 I/O 接口时, 应支持常见开关量传感器的接入与处理, 具备上/下拉功能, 避免输入状态不明; 在设计 A/D 转换接口时, 应支持常见模拟传感器的接入与处理, 具有电阻型、电流型和电压型等传感器的调节电路, 并依据采集信号的特点, 设计合适的信号放大电路或滤波电路; 在设计数字接口单元时, 应支持常见数字式传感器的接入, 要求采用各类常见的物理封装形式, 以方便集成 UART、SPI 和 1-WIRE 等不同接口类型的传感器。

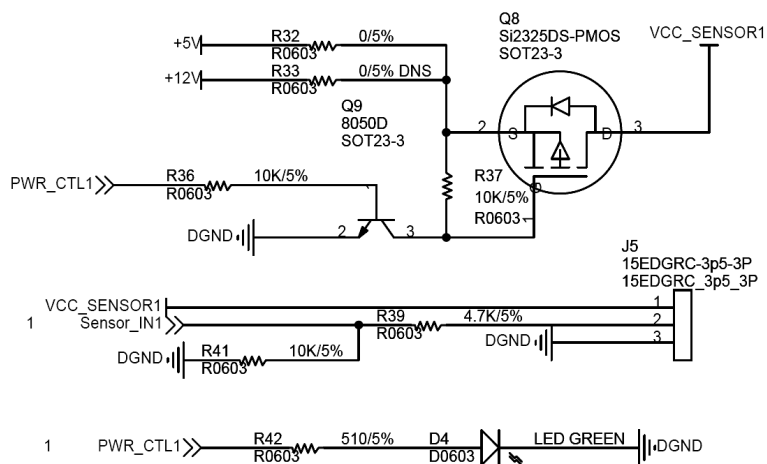


图 8-17 成员节点感知模块原理图

#### 4) 辅助模块的设计

成员节点辅助模块主要是指 TOA 定位，其作用是实现成员节点的自定位，为感知数据提供位置信息。本系统采用了 WellNode 公司提供的 NanoPAN5375 定位模块，并在成员节点底板上提供双列 2.54mm 间距 32 引脚的集成接口。成员节点辅助模块 TOA 定位单元原理图如图 8-18 所示。

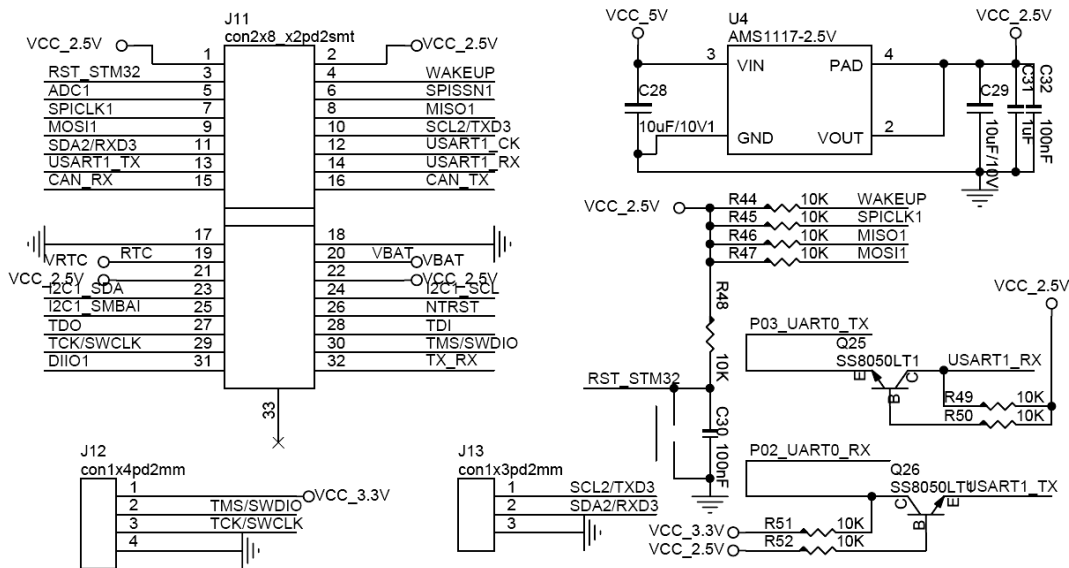


图 8-18 成员节点辅助模块 TOA 定位单元原理图

TOA 定位单元具有测距和定位估算功能，其中测距采用到达时间的测距方法，定位估算采用最大似然估计方法进行位置估计。该成员节点辅助模块可支持二维平面定位和三维立体定位，同时支持绝对坐标输出和相对坐标输出。

基于上述处理模块、通信模块、能量模块、感知模块和辅助模块的设计, 成员节点具体实现的实物图如图 8-19 所示。

成员节点可以以即插即用的方式接入光电、磁敏、红外对射、震动以及射频识别等多种类型传感器, 并具有数据采集、数据处理、通信传输和低功耗控制等功能, 是重要目标防护原型系统中数量较多的一类节点。



图 8-19 成员节点实物图

## 2. 汇聚节点的设计

汇聚节点是无线传感器网络中的特殊节点, 为了满足汇聚节点对大量感知数据进行处理和能力的要求, 汇聚节点一般具有比较强大的计算能力、存储空间和极强的网络通信能力等。基于上述需求, 首先, 汇聚节点处理单元选用了性能更强大的微处理器 S3C6410。其次, 考虑到汇聚节点是外部网络与无线传感器网络之间的网关节点, 因此需要增加额外的数据透传 (简称数传) 模块, 以实现两个网络的互连互通。本系统中汇聚节点主要扩展了 1 个 USB HOST 接口, 1 个标准的 WAN 网络接口和 1 路 RS232 串行通信接口, 以分别实现对 USB 接口的 3G 通信模块、有线网络和通用计算机的接入支持。最后, 汇聚节点通常作为成员节点定位的参考节点, 因此汇聚节点的辅助单元增加了 GPS 定位单元。基于上述分析, 汇聚节点组成结构如图 8-20 所示。通信模块和能量模块的设计与成员节点一致, 这里不再重复, 下面介绍数传模块、处理模块和辅助模块的设计。

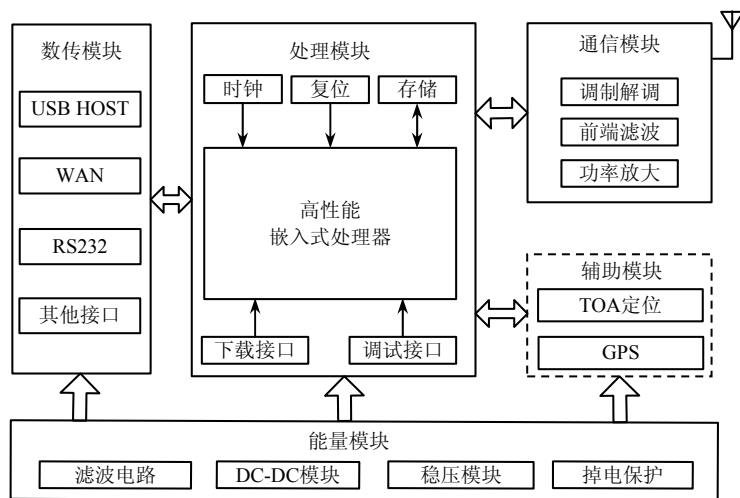


图 8-20 汇聚节点组成结构

### 1) 处理模块

由于无线传感器网络汇聚节点除了承担路由中继功能外, 还需要完成感知数据汇聚、融合处理和存储等功能, 因此基于性能更强大的微处理器 S3C6410 设计了汇聚节点的处理单元, 其处理单元原理图如图 8-21 所示。

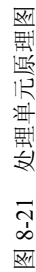


图 8-21 处理单元原理图

在本系统中, 汇聚节点的处理单元还承担 Web 服务器功能, 对外提供统一的感知数据交换接口, 为服务器端重要目标的防护原型系统的应用软件提供数据交换支撑。

## 2) 数传模块

汇聚节点负责无线传感器网络与外部网络的互连互通, 因此基于 WiFi 模块和 3G 通信模块, 设计了汇聚节点的数传模块, 以实现重要目标防护原型系统监测数据的远距离传输。数传模块采用 S3C6410 芯片, 其内部集成了两路 USB 控制器 (1 路 USB HOST, 1 路 USB OTG), 为了实现对 USB 接口 WiFi 模块和 3G 通信模块的接入支持, 设计汇聚节点时将 USB HOST 接口物理引出, USB HOST 接口电路原理图如图 8-22 所示。

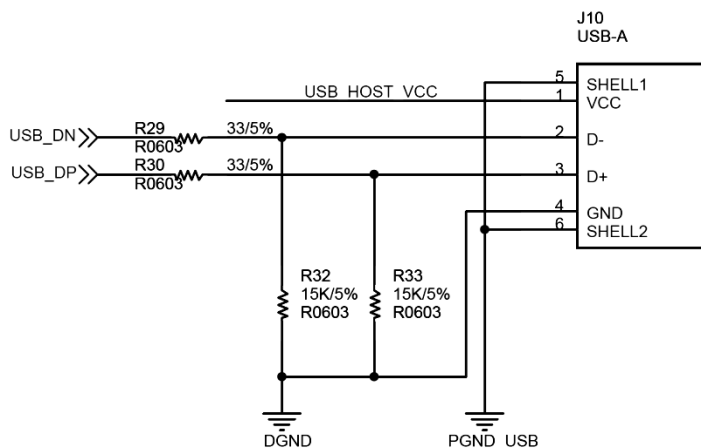


图 8-22 USB HOST 接口电路原理图

汇聚节点作为外部网络与无线传感器网络之间的网关节点, 有线 WAN 网络接口是一种常用的 Internet 接入方式, 其接口电路原理图如图 8-23 所示。

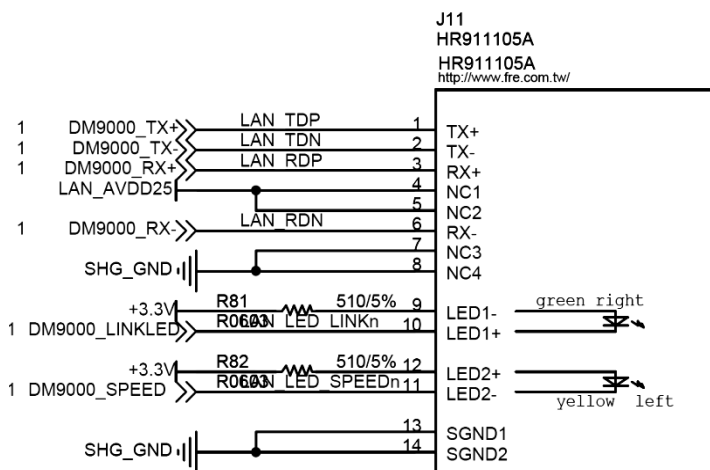


图 8-23 WAN 接口电路原理图

为了降低汇聚节点能耗, 数传模块以事件驱动的模式进行工作, 平时则处于关闭状

态, 以降低通信能耗, 当有重要监测数据或出现可疑入侵目标时, 才唤醒数传模块进行数据传输。

### 3) 辅助模块

汇聚节点的辅助模块除与成员节点一样具有 TOA 定位模块外, 还有一个很重要的功能就是 GPS 定位。GPS 模块是汇聚节点重要的辅助模块, 可实现汇聚节点的绝对定位, 为成员节点自定位提供标定位置, GPS 模块原理图如图 8-24 所示。

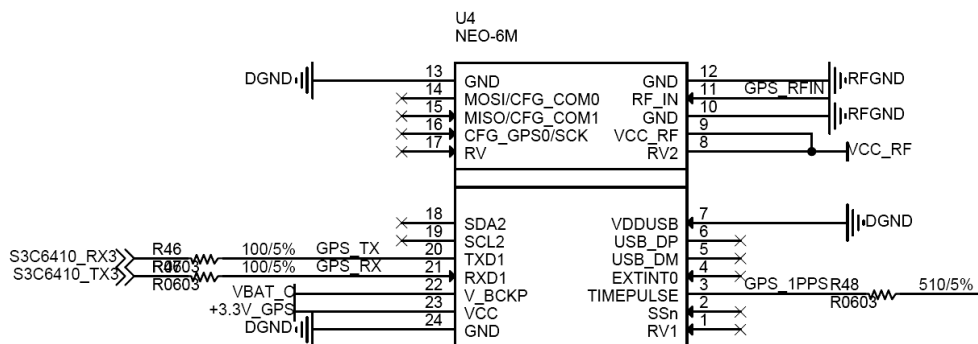


图 8-24 GPS 模块设计原理图

GPS 模块的设计重点考虑 GPS 芯片选型、GPS 天线电路设计、GPS 供电电路设计以及 GPS 控制电路的设计, 同时采用事件驱动模式周期性地唤醒 GPS 模块进行工作, 以降低 GPS 模块的能耗。

基于上述处理模块、数传模块和辅助模块中 GPS 模块的设计, 汇聚节点具体实现的实物如图 8-25 所示。

汇聚节点承担初始网络的自组织发起, 成员节点采集数据的汇聚、处理和存储等功能, 同时还具有网关功能, 可实现与外部系统如无人机或卫星等通信, 是重要目标防护原型系统中的骨干节点。

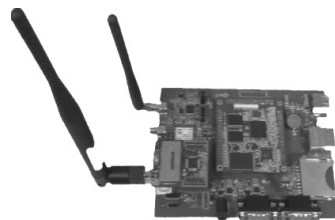


图 8-25 汇聚节点实物

## 3. 节点的软件设计

基于设计的成员节点和汇聚节点, 对开源协议栈 TinyOS 进行剪裁、移植与适配, 采用组件化和模块化的思想及基于事件驱动的执行模型, 构建了适应于重要目标防护原型系统的节点简化协议栈。同时根据成员节点和汇聚节点的功能不同, 对简化协议栈进行了适当修改以满足各自需求。下面重点对简化协议栈中的快速移植 TinyOS 过程进行介绍。

在设计简化协议栈的过程中, 提出了一种在目标平台下快速移植 TinyOS 的方法, 以实现协议栈的跨平台移植, 解决了交叉编译工具链构建、硬件组件适配和系统功能剪裁等多项工程问题。同时针对通信协议栈任务调度机制进行优化改进, 如图 8-26 所示。

可见, TinyOS 提供了任务和事件的两类调度机制, 这里所谓的任务一般用于对时间

要求不高的应用，它实际上是一种延迟计算机制。任务之间互相平等，没有优先级之分，所以任务的调度采用简单的先进先出机制（FIFO）。任务间互不抢占，而事件可抢占，即任务一旦运行，就必须执行至结束，当任务主动放弃 CPU 使用权时才能运行下一个任务，所以 TinyOS 实际上是一种不可剥夺型内核。

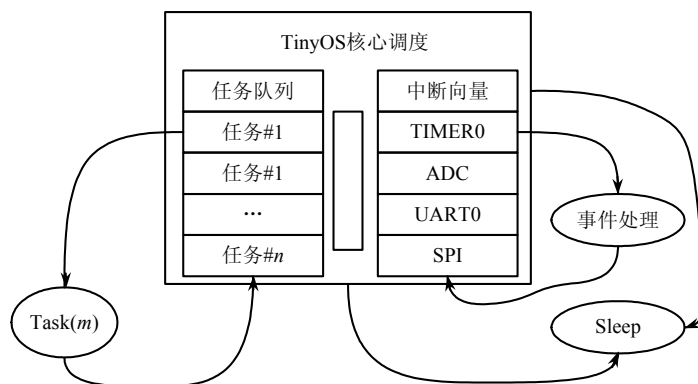


图 8-26 TinyOS 调度机制

TinyOS 的 FIFO 简单调度策略在某些场合会导致过载、任务丢失和数据包吞吐量降低等诸多负面问题。另外，TinyOS 只搭建了基本的调度框架和只满足非精确实时要求，而无法满足实际应用的高精度实时要求，这对嵌入式系统的可靠性会产生影响。

为保证系统的实时性，结合成员节点和汇聚节点特点，采用基于优先级的任务调度机制对 TinyOS 的简单调度策略进行改进。改进后的任务调度策略赋予系统中每个任务一个优先级数，操作系统每次执行完一个任务之后，就从就绪的任务队列中挑选当前优先级最高的一个任务执行，并且是非抢占式的，相同优先级级别的任务按照先进先出策略再调度执行。其中，任务的优先级由下面两个因素决定：一是用户指定，用户在提交任务的时候，根据该任务的重要性及紧迫程度和执行时间指定该任务一个优先级数；二是任务在等待队列中被高优先级任务插队的次数。考虑到在很多应用环境下，系统中比较高的优先级任务会频繁发生，这样就会使低优先级任务阻塞很长一段时间，为了避免这种情况出现，运用了优先级的改进机制，就是当一个高优先级的任务插入到任务队列中低优先级任务之前时，被其“插队”的任务的优先级都上升一个级别。这种机制解决了低优先级任务被高优先级任务阻塞过长的时间或者得不到执行的问题。

### 8.6.3 重要目标防护原型系统

本节以设计面向重要目标防护应用的无线传感器网络防护原型系统为目标，综合集成运用本书相关的理论方法，构建全面覆盖目标区域的监视无线传感器网络，通过对传感器汇聚节点和成员节点的设计，实现震动、磁敏、光电和 RFID 等各类传感器的集成，



并设计自组网算法,解决多传感器之间自组织构建传感网、协同目标定位、分布式信息融合、智能分析报警等技术问题,构建多手段协同的重要目标防护原型系统,为战略物资中心、军事基地、战略指挥所、移动指挥所等提供全维不间断的安全防护监视,实时发现非法入侵目标,保护人员、设施、资源和装备免受敌特或恐怖袭击。下面从重要目标防护原型系统架构、系统功能、组网算法、重要目标防护原型系统应用软件设计几方面进行介绍。

### 1. 重要目标防护原型系统架构

重要目标防护原型系统主要由感知与通信子系统、综合监控子系统以及远程监控子系统三大部分组成,其总体架构如图 8-27 所示。其中感知与通信子系统由感知层的各类传感器设备和通信层的传感器节点自组形成的通信网络组成,感知层包含震动、磁敏、红外、RFID 和光电等多种类型传感器设备以及分布式视频节点,主要提供丰富灵活的多感知手段;通信层主要基于研制的传感器成员节点和汇聚节点,来实现传感器节点的自动分簇、自动组网、多跳通信、抗毁重组和随遇接入等功能,从而实现数据的上传下达。综合监控子系统由处理层和应用层组成,其中处理层由一台或多台计算机组成,主要负责对感知数据进行综合处理,为上层应用提供计算资源和存储资源;应用层是由一套运行在计算机上的重要目标防护原型系统应用软件构成,可实现监控信息显示、目标定位跟踪、节点协同感知、数据协同感知、视频监控分析等功能。远程监控子系统由一个手持便携终端和运行的客户端防护原型系统应用软件组成,可实现对可疑入侵目标的移动监测、网络传感器节点的可视化管控和移动管控等功能。

重要目标防护原型系统物理部署如图 8-28 所示,其中的无线传感器网络包括成员节点和簇头节点(汇聚节点)两类节点,成员节点提供统一对外接口,可以接入多种类型的传感器设备,如声音、震动、磁敏、红外和视频等传感器设备,实现对目标防护区域的实时探测;簇头节点负责管理和转发簇内传感器节点的数据,因其具有数传模块,可承担汇聚节点的角色,通常会根据簇头节点是否处于中心位置来确定哪个簇头节点为汇聚节点,以降低数据通信能耗。可见,重要目标防护原型系统是一种两层分簇结构,成员节点自动组网,与簇头节点形成星状网结构,而每个簇头节点通过自组织方式形成网状网结构,并将簇内感知数据传送给监控中心,监控中心利用重要目标防护原型系统应用软件实时展示目标区域的态势信息,并提供可疑入侵目标定位跟踪、多传感器节点协同感知及异常行为报警等功能,并可以通过监控中心应用软件对网络中节点进行可视化管控。通常,在  $1000\text{m} \times 1000\text{m}$  中小规模应用情况下,可由一个簇头节点承担汇聚节点任务,也可根据具体应用选择多个簇头节点承担汇聚节点任务。汇聚节点可通过自身的数传模块与外部网络进行通信,将重要目标区域监控信息传送给后方指挥中心,从而实现前后方信息融合共享。

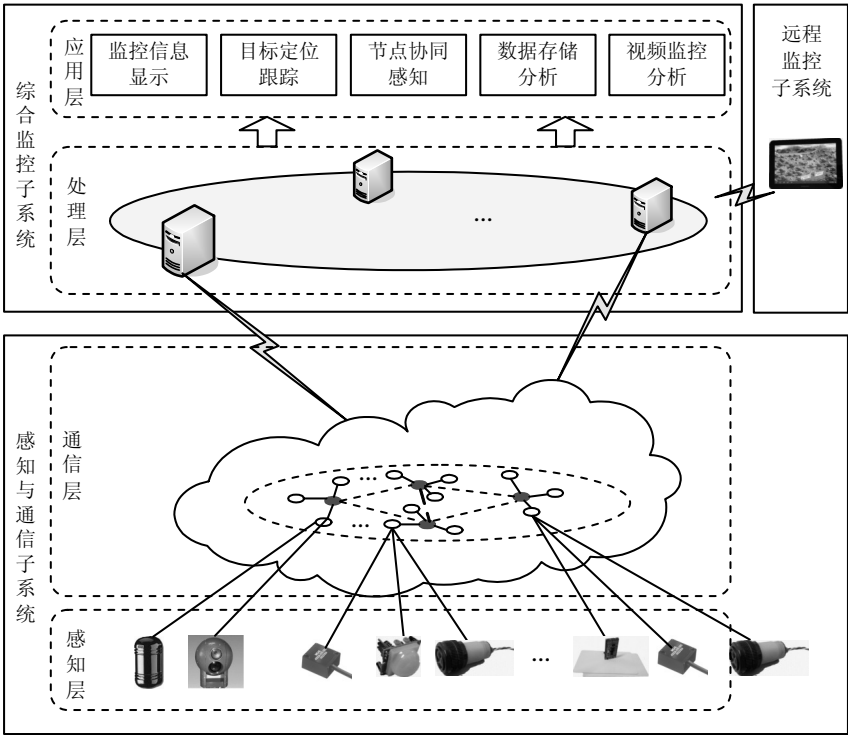


图 8-27 重要目标防护原型系统总体架构

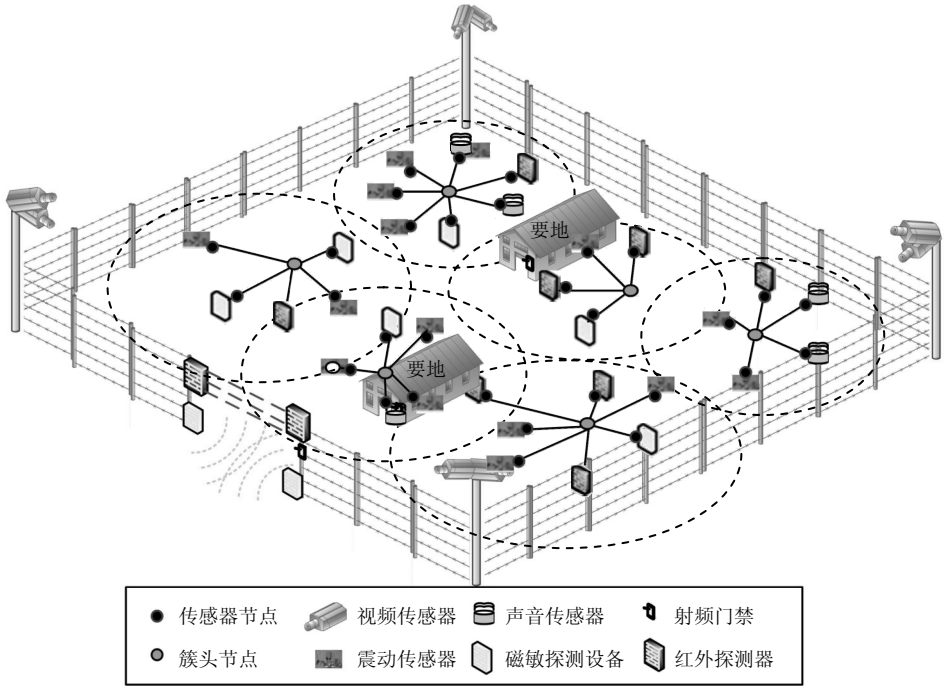


图 8-28 重要目标防护原型系统物理部署图

为了降低能耗和满足不同应用需求,重要目标防护原型系统可支持下述两种监测模式。

(1) 周期性监测模式,即在某一特殊时段,传感器节点处于高性能工作模式,以一定的周期进行监测采样,并周期性地将簇内感知数据传输给 Sink 节点。其中,采样周期可以根据战场状态以及重要目标防护需求进行制定,并可通过监控中心的重要目标防护原型应用软件进行在线设置。周期性监测模式能够在重要时刻对目标区域进行重点防护,以较多的能量消耗实现对目标区域的重点监测和防护。

(2) 事件驱动监测模式,是指一般情况下,传感器节点处于休眠状态,只有部分传感器如震动、红外传感器处于低能耗工作状态,对周围环境进行探测,当感知信息大于设定阈值时,将会唤醒对应传感器节点,并启动其他类型传感器进行联合探测,以进一步确定是否出现可疑目标。同时,唤醒的传感器节点还可以唤醒周期的传感器节点进行协同探测,并启动周期性监测模式。

整个重要目标防护原型系统以簇为基本单元构成可扩展的无线传感器网络系统,具有较好的可控性和安全性。同时,在该原型系统中,由于簇头预先可知,因此可以有效地降低拓扑结构创建和网络协议设计的复杂性,有利于网络的维护和长期使用。

## 2. 重要目标防护原型系统的功能设计

无线传感器网络的重要目标防护原型系统基于自主研发的成员节点和簇头节点(汇聚节点)两类设备,综合接入震动、红外、磁敏、声音和视频等传感器,通过自组网算法实现节点的自动组网,形成覆盖目标区域的全维监测网络,对入侵目标进行监测预警,实现目标区域安全防护。该系统具有多感知功能、即插即用功能、多跳通信功能、网络管控功能、分布式视频处理功能、目标识别与联动探测功能、目标定位功能和感知信息融合功能,下面分别简单介绍。

(1) 多感知功能。成员节点提供统一接口,可支持震动、磁敏、红外和声音等多种类型的传感器接入,实现对目标区域立体、全维、多形式的综合感知。同时以规范化接口驱动实现不同传感器感知数据的转换、接收和存储,并在前端内置了多传感器采集处理软件功能模块,以实现所有接入传感器数据的实时采集和预处理。

(2) 即插即用功能。军事目标如移动指挥所等防护系统需要快速部署、快速形成防护网络,因此要求基于无线传感器网络的目标防护系统具有“即插即用”组网接入功能,即可实现网络组网“自发现”,网络资源“自分配”、接入终端“自配置”等功能,以提升基于无线传感器网络的目标防护系统部署的灵活性和工程实用性。

(3) 多跳通信功能。重要目标防护原型系统支持网络中成员节点感知数据的多跳中继通信功能,可以实现前端传感器采集数据的实时上传;支持监控中心管控指令的实时下达;簇头节点通过数传模块可支持与外部网络间的数据通信。

(4) 网络管控功能。重要目标防护原型系统支持在监控中心对无线传感器网络进行

的集中管控,可实现网络中节点的能耗管控和探测行为管控,并对网络中各节点进行在线故障监测;支持基于节点自身的自主管控,能实现基于定时休眠加中断唤醒策略的低功耗自主唤醒机制和友邻唤醒机制;支持基于手持便携设备的移动管控,以及对网络行为、能耗和报警信息等进行的移动管控。

(5) 分布式视频处理功能。重要目标防护原型系统支持前端多摄像头采集、前端视频编码、前端视频分析处理以及视频数据的多跳传输等功能。

(6) 目标识别与联动探测功能。重要目标防护原型系统可对合作与非合作目标进行识别,基于 RFID 标签实现了对合作目标的标识以及管理;实现了不同成员节点对入侵目标的联动探测,以及多种类型传感器对入侵目标的联动探测。

(7) 目标定位功能。利用无线定位技术,重要目标防护原型系统实现了对合作目标的精确定位,且基于精确定位可实现节点自定位和合作目标位置的估计;利用节点感知信息,可实现对非合作目标即入侵目标的定位,并对其越界行为进行报警。

(8) 感知信息融合功能。重要目标防护原型系统支持节点端感知信息的分布式融合处理,让簇头节点对感知信息进行分布式预处理、检测及融合等;支持在监控中心端进行多源异构信息的融合,可以完成多源异构信息分析、状态估计和融合结果预测等,并为重要目标防护系统的协同感知和威胁估计等相关应用提供服务。

### 3. 重要目标防护原型系统组网算法的设计

基于无线传感器网络的重要目标防护原型系统的组网算法的核心部分是数据链路层、网络层和数据融合层相关算法。其中,数据链路层的核心是 MAC 协议,负责带宽利用率和传输的实时性;网络层的核心是路由协议,负责选择采集信息和控制信息的传输路径;数据融合层主要用于多源异构数据的融合处理,降低冗余数据的传输并提高监测的精度。下面重点介绍路由协议设计和数据融合算法设计。

#### 1) 路由协议的设计

基于无线传感器网络的重要目标防护原型系统的路由协议以简单、节能、高效为设计宗旨,来设计基于簇的分层路由协议——最小跳数路由算法。其基本原理是在一定的节点发射功率下,做到每跳尽最大距离传送,即最大可能地利用发射功率传递信息。该算法不需要节点维护整个网络节点的拓扑结构,在中小规模的无线传感器网络中具有很好的应用前景,因此比较适合目标防护系统。最小跳数路由算法工作的基本过程是:首先建立最小跳数场,然后基于最小跳数场进行数据传送。其中最小跳数场的建立采用经典的扩散算法,具体过程如下。

(1) 每个传感器节点的初始跳数被设置为无穷大或很大的数值,如 1000 (可以认为是通常网络中的跳数不可能达到的数量)。

(2) 簇头节点广播一个建立跳数场的信息包,告知自己的跳数为 0,接收到该信息的

一跳邻居节点首先判断下自己到簇头的距离是否大于自己的最大通信距离。如果小于这个距离,就将自己的跳数设置为  $0+1=1$ ,并将簇头节点作为自己的转发节点,同时产生一个新跳数为 1 的信息包,向自己的邻居广播;如果大于这个距离,则丢弃该信息包。

(3) 当传感器节点  $M$  从传感器节点  $N$  处收到含有节点  $N$  的最小跳数值  $LH_N$  的广播信息时, $M$  需先判断一下  $M$  到  $N$  的距离是否大于  $M$  的通信范围,如果大于这个距离,则丢弃;否则执行步骤 (4)。

(4) 如果  $M$  的最小跳数值  $LH_M = LH_N + 1$ ,则将节点  $N$  加入自己的  $LH_M$  跳的转发节点集  $LHC_M$ ,执行步骤 (5);如果  $M$  的最小跳数值  $LH_M > LH_N + 1$ ,则令  $LH_M = LH_N + 1$ ,清空  $LHC_M$ ,将节点  $N$  存入  $LHC_M$ ,并执行步骤 (4);如果  $LH_M < LH_N + 1$ ,则抛弃该数据包,执行步骤 (5)。

(5) 广播一个包含自己最小跳数  $LH_M$  的数据包。

最小跳数场建立以后,每个传感器节点只需要存储自己一跳邻居内最小跳数比自己小 1 的节点。当有信息需要发送的时候,可以从最小跳数节点集中指定一个或多个作为转发节点。对于如何从最小跳数集中选择一个合适的中继节点,主要存在两种不同的策略,即基于距离的选择策略和基于剩余能量的选择策略。

其中,基于距离的选择策略是指依据贪婪算法,每次都选择距离自己最近的节点,使当前传输距离最小,以降低传输能耗。可见基于距离的选择策略并不是一种能量最优传输策略,同时考虑到现有的传感器工作方式大多数是全功率、全向广播工作,缺乏有效的功率控制和可以定向发射的智能天线,因此选最近的节点进行通信传输并不能减少能耗。但是选最近的节点进行传输带来的好处是接收节点的信干燥比高,抗干扰能力强。

基于剩余能量的选择策略是指基于传感器节点剩余能量来选择下一跳节点,进行数据传输。首先,选择剩余能量较多的传感器节点作为中继节点进行数据传输,对于剩余能量较少的传感器节点,应该较少地用来转发数据。但是这种基于剩余能量的选择策略,如果在传感器节点间没有协同的话,比较容易造成一个剩余能量较多的传感器节点被其他几个传感器节点同时选作转发节点,从而产生拥塞;但是如果传感器节点之间有协同的话,则会产生过多的能量开销,因此需要选择简单高效的协同方法。

于是,重要目标防护原型系统中采用了基于距离和基于剩余能量的综合选择策略,在传感器节点发送的数据分组报头中,包含自己剩余能量的百分比、位置信息,以使其他节点很容易计算出选择该节点转发的概率。其基本过程如下。

假设一个传感器节点的最小跳数集有  $n$  个节点,则其最小跳数集为  $LHC = \{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n\}$ ,定义选择每个节点的概率集为  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n\}$ ,并满足  $p_1 + p_2 + \dots + p_i + \dots + p_n = 1$ 。如果考虑剩余能量和距离的话,选择每个节点的概率为  $p_i = \lambda p_{i1} + \beta p_{i2}$ ,其中  $(\lambda + \beta = 1)$ ,  $p_{11} + p_{21} + \dots + p_{n1} = 1$ ,  $p_{12} + p_{22} + \dots + p_{n2} = 1$ ,

$p_{i1}$  是按照剩余能量计算节点  $i$  被选中的概率,  $p_{i2}$  为按照距离远近计算节点  $i$  被选中的概率,  $\lambda$  和  $\beta$  分别代表能量和距离在计算时所占的比重, 上述参数可根据实际应用需求进行设置。

## 2) 数据融合算法的设计

无线传感器网络的数据融合算法是一种多源数据处理技术, 其基本思想是在传感器网络收集数据的过程中, 利用传感器节点自身的计算能力和存储能力, 对采集的数据进行一定程度的融合处理, 消除冗余信息, 减少节点所需传输的数据量, 同时将来自多个传感器节点的数据进行处理, 获取比单个节点更为有效、准确和更符合用户需求的数据信息, 传送给汇聚节点, 以达到准确收集数据、提高资源利用率和降低网络能量消耗的目的。

在基于无线传感器网络的重要目标防护原型系统中, 数据融合的目标主要包括节省整个网络的能量、增强感知信息的准确性及降低入侵目标漏报率和误报率三个方面。

### (1) 节省整个网络的能量。

数据融合可在单个传感器节点或簇头节点先对监测数据进行融合处理, 去除冗余数据, 在满足应用需求的前提下将需要传输的数据量最小化。众所周之, 节点发送一个比特的数据所消耗的能量约为 4000nJ (纳焦), 而处理器执行一条指令所消耗的能量仅为 5nJ, 因此在中间节点进行融合处理操作将会极大地降低数据通信能量的消耗。

### (2) 增强感知信息的准确性。

部署在战场监测环境中的低廉、微型传感器节点获取的信息可能存在着较高不可靠性, 因此为了获取较高精度和可信度的数据, 需要对监测同一对象的多个传感器数据进行融合处理。同时, 由于相邻传感器节点监测区域大致相同, 其获得的数据也有很大的相似性, 通过简单的对比、滤波等处理可以很方便地剔除错误或误差较大的感知数据, 增强传输数据的准确度。

### (3) 降低入侵目标的漏报率和误报率。

利用多个簇监测的信息, 在 Sink 节点进行数据融合, 对可疑入侵目标进行识别和判断, 及时发现入侵目标, 以降低入侵目标的漏报率和误报率。同时通过在 Sink 节点对感知数据的融合, 实现对入侵目标的位置、状态的估计, 提高对入侵目标监测的准确度。

为了实现上述目标, 可以采用的方法有互补数据融合方法、冗余数据融合方法和协作数据融合方法, 如图 8-29 所示。

其中, 互补数据融合是指当多个源数据来源于一个广泛区域中两个不同部分时, 通过数据融合技术将不同部分的信息叠加, 就可以获取更完整的信息; 冗余数据融合是指当两个或多个独立的源数据来源于同一区域的相同信息, 这些数据就可以通过冗余数据融合减少数据量, 以用来增加信息的可靠性和准确度; 协作数据融合是指当两个或多个

独立的源数据分别监测了同一区域的不同属性的信息, 通过综合协作融合可以将数据融合成新的信息, 这可能比最初的数据要复杂, 但从应用的角度看, 能够更好地代表真实的事物。协作数据融合的经典例子是目标跟踪, 通过多个节点的信息来进行基于角度和距离的计算, 以确定目标的位置。

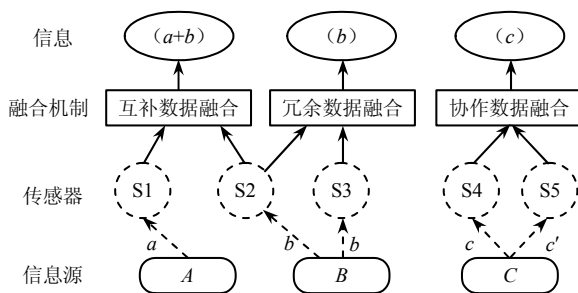


图 8-29 WSN 数据融合方法

互补数据融合、冗余数据融合及协作数据融合的具体实现包括加权平均法、聚类分析、极大似然估计、卡尔曼滤波法、贝叶斯估计法和 D-S 证据理论等。下面以重要目标防护原型系统中基于 RSS 与 CSS 组合定位数据融合方法为例, 阐述数据融合方法在系统中的具体应用。

研究表明, 单一的 RSS 与 CSS 定位方法在性能上都无法达到令人满意的精度, 特别是在非视距 (None Line of Sight, NLOS) 环境下, 定位结果通常都会有较大的偏差。因此需要将数据融合技术应用到定位中, 实现 RSS 定位与 CSS 定位的融合, 从而改善定位的精度。因此, 提出的 RSS 与 CSS 组合定位数据融合模型如图 8-30 所示。

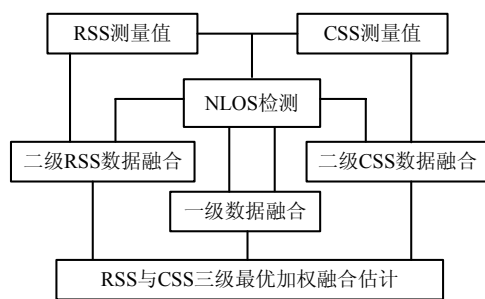


图 8-30 RSS 与 CSS 组合定位数据融合模型

#### ① 一级数据融合。

一级数据融合基于联合条件概率的 NLOS 检测方法对获取的 RSS 和 CSS 测量值进行融合, 其融合方法主要采用卡尔曼滤波方法, 基本步骤如下所示。

第一步 初始化: 令  $k=1$ ,  $\hat{x}_{k-1} = \hat{x}_0$ ,  $\hat{P}_{k-1} = P_0^-$ 。

第二步 进行滤波增益矩阵计算

$$K_k = P_k^- F_k^T (F_k P_k^- F_k^T + R_k)^{-1} \quad (8.1)$$

第三步 测量更新

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - \hat{y}_k^-) \quad (8.2)$$

$$P_k = P_k^- - K_k F_k P_k^- \quad (8.3)$$

#### 第四步 时间传播

$$\hat{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k \quad (8.4)$$

$$P_{k+1}^- = A_k P_k A_k^T + Q_k \quad (8.5)$$

#### ② 二级数据融合。

二级数据融合需要分别将两种单一的原始测量参数与经过处理后得到的测量值进行数据融合，这主要采用基于贝叶斯的数据融合方法。首先，根据数据统计信息采用贝叶斯方法将测量参数按方差加权，其加权公式为

$$x_c = x_o + \frac{\sigma_o^2}{\sigma_c^2 + \sigma_o^2} (x_m - x_o) \quad (8.6)$$

$$\sigma_c^2 = \frac{1}{\sigma_m^{-2} + \sigma_o^{-2}} \quad (8.7)$$

式中， $x_o$  和  $x_m$  是 RSS 或 CSS 的原始测量均值和经过基于联合条件概率的 NLOS 判决方法处理后得到的测量均值， $\sigma_o^2$  和  $\sigma_m^2$  分别是对应的方差，而  $x_c$  和  $\sigma_c^2$  为融合后定位估计值的均值和方差。然后利用三边定位的方法，有

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = R_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = R_2^2 \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 = R_3^2 \end{cases} \quad (8.8)$$

再分别根据获得的 RSS 或者 CSS 值进行定位，由此方法，通过二级数据融合获得目标位置估计值。

#### ③ 三级数据融合。

按照最优加权融合算法对一级融合结果和二级融合结果进行融合计算，加权因子分别设为  $a_1$ 、 $a_2$  和  $a_3$ ，基于最佳线性加权融合方法可获得加权因子  $a_1$ 、 $a_2$  和  $a_3$  的估计值，即

$$a_1 = \frac{1}{\sigma_1^2} \left( \frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \frac{1}{\sigma_3^2} \right)^{-1} \quad (8.9)$$

$$a_2 = \frac{1}{\sigma_2^2} \left( \frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \frac{1}{\sigma_3^2} \right)^{-1} \quad (8.10)$$

$$a_3 = \frac{1}{\sigma_3^2} \left( \frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \frac{1}{\sigma_3^2} \right)^{-1} \quad (8.11)$$

最后可获得融合结果为

$$\hat{x} = a_1 \hat{x}_1 + a_2 \hat{x}_2 + a_3 \hat{x}_3 \quad (8.12)$$

通过采用数据融合技术可有效提高传感器节点的定位精度，为目标防护系统精确检测入侵目标和定位入侵目标提供了良好的技术支撑。在重要目标防护原型系统中，在多



个层次都应用了数据融合相关方法,如在传感器节点端应用了加权平均法对一段时间内的传感器数据进行滤波,在汇聚节点使用贝叶斯估计方法,对可疑入侵目标进行识别和判断等。

#### 4. 重要目标原型系统的应用软件设计

为了给多种操作服务提供图形化的支撑和给用户提供可视化图形展示,结合重要目标防护系统功能,该系统开发了重要目标防护原型系统的应用软件。

##### 1) 软件功能

重要目标防护原型系统的应用软件主要完成如下九项功能。

- (1) 对传感器节点数据进行实时查询;
- (2) 对传感器节点进行管控;
- (3) 对传感器节点在线故障进行监测;
- (4) 网络节点分簇显示;
- (5) 目标识别的显示;
- (6) 联动探测的显示;
- (7) 目标定位与跟踪的显示;
- (8) 入侵目标的报警;
- (9) 目标的视频显示。

##### 2) 软件界面

重要目标防护原型系统的应用软件界面如图 8-31 所示。

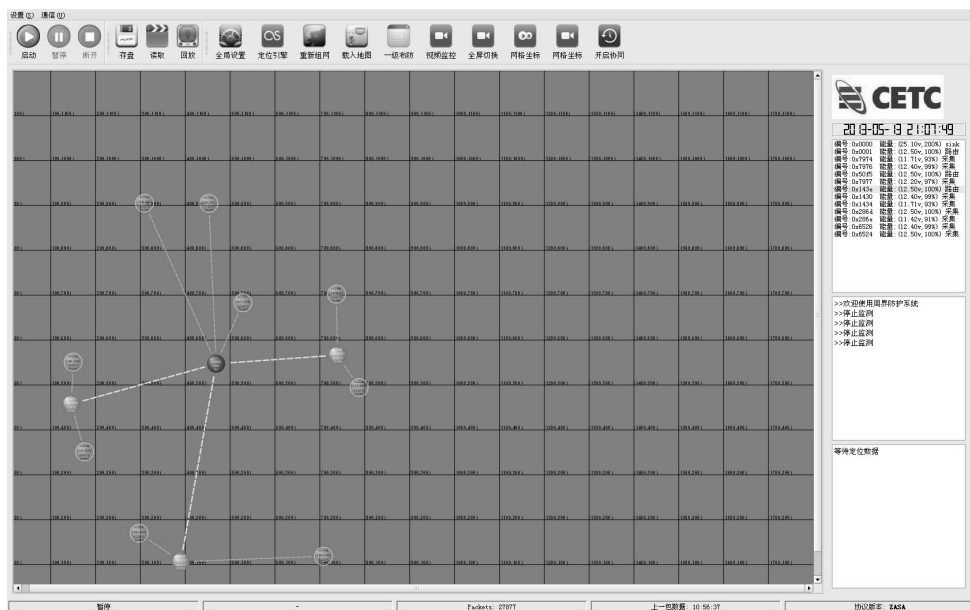


图 8-31 重要目标防护原型系统应用软件界面

该主界面显示整个无线传感器网络的拓扑和节点的运行状态，上方任务栏有多个按钮，包括数据查询、目标定位、节点管控和视频展示等，可以实时以图形化的方式对目标区域感知数据进行调阅，实现对入侵目标图形化的报警显示，从而保护人员、设施、资源和装备等重要目标免受敌特或恐怖袭击。

## 第9章

# 建议与展望



无线传感器网络的特点决定其在军事领域中的地位和独特作用。相信随着信息技术的进步，无线传感器网络会朝着纳米化、自主化、智能化的方向演进，也必将突破现有的军事应用领域，横向拓展、纵向延伸至更多的军事应用场景，发挥不可替代的作用。本章将从宏观战略和技术发展两个层面给出军事应用建议，并对未来进行总结和展望，与此同时，对未来无线传感器网络军事应用中亟需重点关注的问题进行分析，以期为读者思考无线传感器网络军事应用的未来发展提供借鉴。



## 9.1 无线传感器网络军事应用的建议

近年来,包括中国在内的一些国家无线传感器网络发展迅速,在民用领域的应用已具备相当的基础。对无线传感器网络基本特点的准确把握是指导和推动无线传感器网络军事应用的基本前提。因此,建议开展无线传感器网络军事应用特点的分析,调研当前军队无线传感器网络的应用需求和支撑能力,评估无线传感器网络军事应用的发展现状和发展条件。

在充分掌握国内外无线传感器网络军事应用发展的特点,以及掌握军队信息化建设对智能化发展需求和支撑能力的基础上,进一步对无线传感器网络军事应用发展方向和存在的问题进行相关调研分析,以明确发展目标,认清发展障碍。建议重点开展作战训练、战场感知、后勤保障和武器装备等方面与无线传感器网络军事应用相结合的调研分析,研究提出无线传感器网络军事应用发展的主要问题。下面从宏观战略和技术分析两个层面考虑。

### 1. 宏观战略层面

#### 1) 构建无线传感器网络军事应用理论体系

建议立足军事网络自身的特点和现有的信息、控制、管理系统发展水平,综合考虑未来相关技术的发展方向,参考国内外的研究成果,提出无线传感器网络军事应用的体系架构,保证无线传感器网络军事应用具备可靠、灵活和开放的特点,做好规划建设、运行控制、资产管理和用户管理等方面的工作,能够同时满足作战训练、战场感知、勤务支援和装备保障的需要。具体来说,①制定发展路线图。建议以军队宏观政策为导向,立足于世界国防发展技术的前沿,从信息作战实际需求出发,坚持统一设计、整体推动、试点先行和逐步推广的方针,依托科技创新和管理创新,充分调动系统内外资源,形成前瞻研究、试点应用、大范围推广和梯级推进机制,建立技术标准和管理标准体系,建设贯穿于信息作战全领域、全过程和全寿命的广域全景分布式一体化架构,建成符合国家战略和军事发展要求的无线传感器网络军事应用体系。②开展军事应用理论创新和技术应用。理论和技术创新与应用是实现无线传感器网络军事应用的必由之路。建议围绕无线传感器网络军事应用的重大需求和重要特性,以构建感知互动、自治高效和安全可信的无线传感器网络军事应用系统为目标,以无线传感器网络的非确定性、高混杂性和强关联性为出发点,重点解决军事物理空间和信息空间的复杂耦合关联、互动系统的自治机理,以及物化安全可信保障等方面的关键问题。

#### 2) 建设无线传感器网络军事应用的标准规范

建立统一规则 and 标准体系是无线传感器网络军事应用的关键环节,也是无线传感器网络军事应用能够正常运行的基本保证。建议由总部统一部署,通过组织院校和研究所

等方面的研究力量集中科研攻关,把寻址、网络、通信和安全等标准集成到无线传感器网络军事应用系统的架构中,形成完整的基于无线传感器网络智能化的规范和标准体系,最终目标是实现从“感知”到“控制”各个环节中相关作战信息的集成与共享。

### 3) 推动无线传感器网络军事应用的典型示范

建议在遵循所制定的无线传感器网络军事应用发展路线图的基础上,开展无线传感器网络在战场感知、智慧营区(机场、阵地和军港)、军事物流、武器控制和军事训练等领域的典型示范应用。通过选择重点区域、作战单位进行无线传感器网络军事应用建设试点,评估试点效果,积累相关经验,稳步推进无线传感器网络大规模的军事应用。同时,配合军队信息化建设进程,选取先进适用技术,在全军逐步推广应用,推动无线传感器网络军事应用的全面实施。

## 2. 技术层面

若从技术层面,无线传感器网络军事应用尚存在很多前沿的、基础的、核心的技术需要突破。实际上无线传感器网络技术具有很强的军民两用性,尽管很多技术具有通用性,但在军事应用中,无线传感器网络往往面临着更多复杂的挑战。美军在 20 世纪 70 年代就已经开展军用无线传感器网络技术的研发,并制订了多项技术计划,谋求关键技术突破和技术成果转化。下面依据美军相关公开材料,阐述未来无线传感器网络军事应用中需要重点突破的具体技术应用。

### 1) 最优化能量效益型路由协议技术

路由协议是无线传感器网络实现节点相互通信的基础,降低网络能耗,延长工作时间是美军选择路由协议的出发点。美军开发路由协议时,强调以数据为中心的、最优化能量效益型数据协议,重点考虑初始路由响应时间、链接失败时新路由发现时间、在密集网络中的运行能力、路由控制信息、在静态流量和功率下降情况下的运行能力几个因素。为此,美军已开发出一种定向扩散路由的局部算法,该算法的主要任务是选择能耗最小的路由途径。目前,路由协议虽然已取得了较大的进步,但还有很多问题尚待解决。例如,如何构建能量有效的全局最优路由策略,如何解决路由算法的安全性问题等。为进一步改进路由协议,DARPA 制定了动态传感器网络计划,继续开发更加先进的传感器网络能量感知路由技术和算法。此外,美军还在开发面向无线传感器网络的先进加密技术和认证机制,研究路由协议的安全机制。

### 2) 自适应拓扑控制技术

无线传感器网络是一种节点拓扑结构高度动态变化、没有预设网络基础设施的无线网络,具有可临时组网、快速展开、无控制中心和抗毁等特点。这种网络在部署后,首先要解决网络的拓扑结构控制问题。军用无线传感器节点一般部署在恶劣环境中,甚至

部署在敌方区域之内,很容易受到破坏而失效。2005年,DARPA制定了未来无线网络计划,开发了自适应拓扑控制技术,能够根据环境变化自动调整拓扑结构和运行节点,构建智能型无线传感器网络。

### 3) 自我感知对等网络技术

在战场上,无线传感器网络节点要能够在高度动态的环境中以自组网的方式布设,网络的实际使用情况是不可预知的。因此对网络资源准确、动态地认知非常关键,这对于自主完成网络的部署、配置和管理极为重要。2003年以来,美军一直发展自我感知对等网络技术,目的是开发可扩展的、可分散控制的传感器计算网络,通过自我感知建立大规模自主无线传感器网络和通信机制,保证无线传感器网络的正常工作。为实现无线传感器网络自我感知,美军开发了用于规划用户任务计划的高级语言,它使一个无线传感器网络的功能如同一个分布式认知系统,可以动态地控制资源,提供网络本身及周围环境的准确认知,评估网络组件和通信链接的状态和可信度。一旦网络节点失效或者被破坏,自我感知对等网络将会立即对相关任务进行控制。目前,这项计划已完成分布式感知网络中所有静态体系结构和感知的表示方法,并正在开发相关的分布式智能体协同技术、信息融合算法和相应的网络控制语言等。

### 4) 自适应网络技术

美军正在发展适应性网络技术,旨在对网络各部分进行识别和描述的基础上,建立一个认知平面,通过认知平面实现网络的适应性、自我诊断和重新配置,从而使网络具备自治、自组织和自适应等属性。

### 5) 群体控制技术

DARPA开发的群体控制技术,其主要任务是开发非线性动态的数学模型,对群体行为进行预测、设计和控制。目前,群体控制技术试验结果表明,美军已初步具备了控制1万个独立的无线传感器网络节点的能力。这项技术的发展,将为美军未来部署大规模传感器节点奠定重要的技术基础。

### 6) 新型能量管理技术

军用传感器网络要求能够长期在无人值守的状态下工作,因此有效的节能策略是无线传感器网络管理过程中必不可少的研究内容,也是美军目前发展传感器网络技术所面临的重大技术挑战。能量问题已经成为制约传感器向微型化、轻型化和长寿命发展的瓶颈。美国国防部科学技术委员会在2006年3月发布的《国防关键技术》中,将无线传感器网络的能量管理列为关键技术,提出从微型化高致密电源、近地通信天线和体系结构/系统设计优化工具等角度出发,切实解决能量管理问题,为无线传感器网络的轻质、微型化和长寿命及大规模部署奠定技术基础。

### 7) 网络化信息处理技术

网络化信息处理技术是面对无线传感器网络的一种新型信息处理机制，它可以使不同模式节点之间协同工作，实现信息的网络化处理，共同完成对目标的高精度跟踪，并可实现用户与网络之间的交互与查询。美军的 SensIT 计划已开发出网络化信息处理技术，能够在分布式计算环境下，实现动态交互式查询和跟踪。2002 年，海军陆战队在演习中使用了 SensIT 网络，其声模式和震动模式的传感器节点通过网络化信息融合自动生成了一幅战场图像，并成功地将图像传送给附近的指挥所。这项技术的发展极大地提高了无线传感器网络的协同能力。目前，该技术已经进入产品应用阶段，美国海军陆战队的地面传感器以及特种作战传感器等工程项目都已开始应用此项技术成果。

## 9.2 无线传感器网络军事应用展望

近年来，随着无线传感器网络军事应用理论和应用实践的不断深入，无线传感器网络军事应用已呈现出从理论研究走向应用开发，从试验走向实用，从区域示范走向大规模应用，从单一化走向多样化的发展趋势，未来无线传感器网络的发展和军事应用呈现出明显的纳米化、自主化和智能化等特点，下面结合美军在无线传感器网络军事应用方面的探索，对未来无线传感器网络军事应用进行展望。

### 1. 自主反应无线传感器网络

美国空军研制了一种叫 CBU-97 的传感器引信炸弹，该炸弹装备了无源红外和主动激光传感器，用于发现目标并自主反应，引导炸弹击中目标。这是美国空军智能化最高的可寻找目标的“智能”炸弹，美军在 2003 年 3 月入侵伊拉克的行动中，第一次就使用了 CBU-97 传感器引信炸弹。

此外，早在伊拉克战争中，为应对巷战中伊拉克的狙击手，美军专门研制了“机动还击系统”。这也是一种无线传感器网络，是在装甲卡车上安装摄像机和声音传感器装置，在遭到袭击后由声音传感器自动定位子弹来袭的方向，并指引武器自动还击。

### 2. 自供电式无线传感器网络

美国洛克希德·马丁公司研制出一种无线地面传感器系统——自供电地面传感器（SPAN）系统，SPAN 系统本质上是一个不引人注目的传感器节点网络，每个传感器节点小到足以放入手掌，并且可以伪装成一个个小的石头块，如图 9-1 所示。该传感器节点能够通过自身的能量收集系统和能量管控系统实现自供电，其中能量收集系统可以利用周围环境中的太阳能和振动能来转化为自身能量；能量管控系统主要控制传感器节点的休眠，通过自身的震动传感器来感知周围的环境，唤醒传感器节点，也可以通过网络中的其他传感器节点进行唤醒，从而降低传感器节点的能量消耗。



图 9-1 SPAN 系统传感器节点

SPAN 系统将被用于连接无人机系统 (UAS 或 UAV), 以提供广阔的覆盖能力和对指定区域的持久监视能力。SPAN 系统由使用能量采集技术的小型器件组成, 因而此多功能无线传感器平台不需要更换电池。它利用其周围环境中的现成能源, 可以实现自身再充电, 且其间节点不会传输信号, 除非有一个读数传感器。该系统通过在一个网格结构上或地面的每个节点向相邻的节点传输相关数据, 直到信息最终传输到一个宽广区间的通信链上。利用 SPAN 系统可自动提醒 UAV 识别威胁, 而无须依赖于一个单独的操作报警系统。同时也增强了对地面态势的感知能力, SPAN 系统与 UAV 连接还降低了对特定地区监视的总成本。

### 3. 战场融合无线传感器网络

随着军用传感器类型的不断变化、数量持续增多, 如何对传感器信息与数据库信息融合成为关键问题, 也使战场传感器融合变得越来越重要。不断发展变化的网络中心战场是传感器融合的主要动力, 单一传感器或来自一个传感器的单一数据集时代将一去不复返。未来无线传感器网络要考虑战场传感器的融合设计, 可变规模的弹性无线传感器系统可能会成为一种趋势, 以满足不同类型、不同数量的传感器要求, 并很好地适应未来的发展变化。各传感器的特定功能及多传感器的数据融合都将采用任务定制设计, 包括动态算法变化。

在 DARPA 的资助下, 罗克韦尔·柯林斯公司、波音公司和内华达公司已经开始帮助美军开展传感器战场融合方面的研究。据相关研究人员称, 他们一直在研究不同传感器 (如声呐和超光谱传感器) 对自动化场景的理解, 且能够给定一个数据集来描述场景内容, 因为大部分关注点都是视觉图像。搭载多光谱传感器平台飞过监测区域时, 可通过多光谱信号来提示地面雷达进行跟踪。最终输出结果将是供人们浏览的图像, 但也可发送到其他算法中, 因此实际上其结果既可人工使用, 也可机器操作。

### 4. 生化智能无线传感器网络

在核、生、化作战环境中, 将无线传感器网络布设于己方阵地, 可作为核、生、化



预警系统。美国国防高级研究计划署（DARPA）正在实施生物分子微系统的模拟计划，开发生物/化学智能传感器，以在极低的浓度中用几分钟甚至几秒钟探测生物/化学分子。这项技术用于分布式远程传感器网络后，将能够实时进行生物/化学的预警。

### 9.3 无线传感器网络军事应用的问题

无线传感器网络带来的机遇随处可见，但将无线传感器网络应用于军事领域，尚存在很多挑战。要使得无线传感器网络与实际的军事应用环境深度融合，必须掌握在通信网络中连接和管理传感器节点的基础性知识，并采用可以升级和高性价比的方式来组建无线传感器网络。因为无线传感器网络属于自组织网络但又有自组织网络没有的一些特性。无线传感器网络的军事应用面临和自组织网络一样的挑战，如能量的限制和路由问题等。但是，无线传感器网络的通信模式不同于普通自组织网络，对寿命有特殊的要求且通常包含移动节点。在无线传感器网络中，大部分节点都是静态配置的。然而，由一些基本节点组成的网络通常被一些动力强劲的移动节点覆盖。这些被基本传感器控制的节点通常可以移动到目标区域甚至可以监控入侵者。下面从技术实现与应用角度，分析无线传感器网络在军事领域应用中需要重点关注的能量供应问题、服务质量问题、网络运行问题和网络拓扑结构问题。

#### 1. 能量供应问题

在人无法接近的恶劣或者相对危险的远程环境中，延长无线传感器网络中传感器的工作寿命至关重要。采取什么节能策略延长传感器的寿命成为制约无线传感器网络推广应用中的最主要问题。由于无线传感器网络节点分布众多，覆盖范围大，工作环境复杂，因而仅仅通过更换电池来延长网络工作寿命的方法是不现实的。对于整个传感器网络而言，必须在设计时就充分考虑节能降耗问题，使得节点生存时间长达数月甚至数年，以尽可能少的能量完成尽可能多的任务。许多研究者致力于从不同方面改进能量的利用率。在无线传感器网络中，能量主要消耗在数据传输、信号处理及硬件操作三个方面。现在被认为可行的高效方法是最小化网络协议方面的能量需求，以及最小化用于网络控制和调节信息传输的能量需求。

目前，采用休眠机制是节省能源的最有效的方式之一。由于传感器节点监测事件的偶发性，没有必要让所有单元均工作在正常状态下，因此可以启用休眠模式，根据工作需求自适应地休眠和唤醒，调整状态节省能量。另外也可根据负载状态动态调节供电电压，形成一个闭环控制系统，也可达到节省能量的功效。另外，提高电池的容量也可以延长传感器寿命，或者采用太阳能来吸收能量，但在实际生产和应用过程中，由于传感器大小及成本的限制使这些功能得到限制。

## 2. 服务质量问题

无线传感器网络的军事应用对网络本身提出了不同的具体要求,但其目的都是为了提高服务质量。无线传感器网络的构成与传输方式都与传统的数据通信网络有较大差别,它具有以数据为中心的非端到端的网络组织结构,因而对服务质量提出了新的要求。这种新的要求主要表现在以下四个方面。

### 1) 以数据为中心的网络

由于无线传感器网络的主要任务是对事件发生的监控和对周边环境信息的测量,不关注具体数据来源的某一个节点的地址信息,而是需要将监测属性相同且位置相近的节点的信息进行汇总。因而可以对数据进行相似融合之后再传输,以此方式减少网络流量。但是进行数据融合是要以牺牲节点性能为代价,所以在处理融合问题时需要特别处理好服务质量与节点资源消耗之间的关系。

### 2) 资源严重受限

无线传感器网络是一种需要大量节点协同工作的任务型网络,节点众多的特点使单个节点的体积和成本受到很大制约。此处讲的制约包括节点的存储空间大小、处理器性能、传感器种类和能量供应等。因此,在设计保证服务质量算法时,必须尽量保证算法不占用太多节点资源,且算法简单有效。

### 3) 异类传感器网络

在网络进行数据采集及传输的过程中,很难保证每个节点资源的利用程度相同。所以即便网络中节点的设计与配置均相同,在经历一定的工作时间之后,该网络也可以被看做是一种异类传感器网络。现有大量针对提高服务质量设计的算法和对通信协议的修改,基本上都是针对同类网络的。因此,协调网络中各个节点的资源利用和消耗就成为服务质量保证的新的挑战。

### 4) 频繁的网络拓扑结构变化

随着安装在节点上面的传感器种类越来越多,节点的稳定性反而会随着传感器种类的增多而下降。不断有节点出现故障停止服务,网络的拓扑结构就会频繁发生变化,这就会导致更多的能量消耗和绑定表的不断变化,这也成为服务质量保证新的挑战。

## 3. 网络运行问题

无线传感器网络由成千上万的节点组成,单个节点的价格将极大地影响系统的成本。然而,将 MEMS 与电子装置融合到一块芯片的技术仍然进展缓慢。除了天线和电池两个关键部分,小型化会稳步前进,这对改进设计会非常具有挑战性。为了达到降低成本的目的,需要设计对计算和存储能力要求较低的、简单的网络系统和通信协议。此外,降低系统成本的另一个重要因素是减少系统管理与维护的开销。无线传感器网络节点规模较大,人工管理与维护开销很大,因此需要网络系统具有自配置、自修复和容错运行的

能力。自配置是指在没有人工干预的条件下,网络中的节点能够检测到其他节点的存在并共同组成一个具有一定功能和结构的网络系统;自修复是指在没有人为干预的条件下,系统能够检测到网络节点或通信链路的损坏并能够从错误状态中恢复。

#### 4. 网络拓扑结构问题

传统的星形结构包含一个主节点,一个或多个从节点。通信时,主节点与从节点可以直接通信,从节点的通信需要依靠主节点的转发。星形结构适合在一些小规模网络中使用。对于给定的每个节点来说,其通信需要主要取决于节点的位置、发射装置和接收装置的覆盖模式、传输功率、同波干扰、无线连通性及节点间的拓扑图等。这种自组织网络的拓扑结构可能因为节点的变动和传输及接收参数的改变而随时改变。在天线传感器网络中,节点规模很大,节点间以一种对等、多跳的方式通信,系统的动态性很强,需要设计一种适合其通信特点、低开销和便于维护的网络拓扑结构。分布式信号处理需要多网络节点的合作,这种合作必须能够协调信息的有效交换,有可能还包括层次管理的一系列协议。

尽管无线传感器网络军事应用尚存在很多实际问题,但无线传感器网络在军事应用的地位和作用已经得到广泛认可。我们相信,随着信息技术的发展以及人们认识的深入,无线传感器网络必将给在军事领域的应用带来更大的价值!



# 附录 A

## 缩略语对照表



AD	Asynchronous Diffusion	异步扩散同步
AES	Advanced Encryption Standard	高级加密标准
AHLoS	Ad-Hoc Localization System	自组网定位系统
AMRP	Average Minimum Reachability Power	平均最小可达功率
AOA	Angle of Arrival	到达角度
APIT	Approximate Point-in-Triangulation Test	近似三角形内点测试
APTEEN	Adaptive Periodic TEEN	自适应周期节能的阈值敏感的 传感器网络协议
ASCENT	Adaptive Self-Configuring Sensor Networks	自适应自配置传感器网络
BA	Battlefield Awareness	战场感知
BDA	Battle Damage Assessment	目标毁伤效果评估
BFSL	Best Fit Straight Line	最小二乘最佳拟合直线
BP	Back Propagation	神经（网络）
BPS	Binary Proximity Sensors	二进制接近传感器
BSLL	Best Straight Line Linearity	最佳直线线性度
CADR	Constrained Anisotropic Diffusion Routing	约束后各向异性扩散路由
CALB	Congestion-Avoidance scheme based on Lightweight Buffer management	基于轻量级节点缓存状态管理
CCD	Charge Coupled Device	电荷耦合器件
CCF	Congestion Control and Fairness	拥塞控制和公平
CDA	Concealed Data Aggregation	隐藏的数据融合
CDMA	Code Division Multiple Access	码分复用
CEC	Cooperative Engagement Capability	协同作战能力
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor	互补金属氧化物场效应管
CODA	COngestion Detection and Avoidance	拥塞控制和避免
COMPOW	COMmon POWer	通用功率
COMUT	COngestion control for MUlti-class Traffic	多类交通拥塞控制
CS	Compressive Sensing	压缩感知
CSMA	Carrier Sense Multiple Access	载波侦听多路访问
CSP	Cross-power Spectrum Phase	互功率谱相位
CSS	Chirp Spread Spectrum	线性调频扩频
CTBD	Cooperative Tracking with Binary-Detection	基于二元探测的协作跟踪
DARPA	Defense Advanced Research Project Agency	美国国防部先进研究项目署

DB	Distance Bounding	距离限定
DCT	Discrete Cosine Transform	离散余弦变换
DD	Directed Diffusion	定向扩散路由协议
DES	Data Encryption Standard	数据加密标准
DLSS	Directed Local Spanning Subgraph	基于本地生产的子图算法
DMAC	Data—gathering Media Access Control	数据聚集媒体访问控制
DMTS	Delay Measurement Time Synchronization	延迟测量时间同步
DPM	Dynamic Power Management	动态电源管理
DRNG	Directed Relative Neighborhood Graph	有向邻近图
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector	目的序列距离
DSN	Distributed Sensor Network	分布式传感器网络
DSP	Digital Signal Process	数字信号处理
DSTS	Dismounted Soldier Training System	陆军步兵训练系统
DVS	Dynamic Voltage Scaling	动态电压调节
EAR	Energy Aware Routing	能量感知路由
EBS	Exclusion Basis System	排除基准系统
ECEG	Elliptic Curve ElGamal	椭圆曲线 ElGamal 算法
EPL	End Point Linearity	端点线性度
ESRT	Event-to-Sink Reliable Transport	来件接收可靠传输
EVD	Eigen Value Decomposition	特征值分解法
EWCCP	Explicit Wireless Congestion Control Protocol	显示拥塞控制协议
FDMA	Frequency Division Multiple Access	频分复用
FTSP	Flooding Time Synchronization Protocol	洪泛时间同步
GAF	Geographical Adaptive Fidelity	地理位置自适应保真
GBR	Gradient-Based Routing	基于梯度的路由协议
GCC	Generalized Cross Correlation	广义互相关
GEAR	Geographical and Energy Aware Routing	地理位置和能量感知路由
GEM	Graph EMbedding	图嵌入
GG	Gabriel Graph	盖伯图
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
GRAB	GRAdient Broadcast	梯度广播
HEED	HybRiD Energy-Efficient Distributed clustering	混合能量有效分布式聚类
HTCC	Heuristic Topology Control based on Cluster	基于聚类的启发式拓扑控制

IDC	International Date Corporation	国际数据公司
IRA	Irregular Repeat Accumulate	非规则重复累积
ISA	Instrument Society of America	美国仪表协会
JSCC	Joint Source Channel Coding	联合信源信道编码
KLT	Karhunen-Loeve Transform	卡洛
LDPC	Low Density Parity Check	低密度奇偶校验
LDPCA	Low Density Parity Check Accumulate	低密度奇偶校验累积
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy	低功耗自适应集簇分层协议
LMA	Local Mean Algorithm	本地平均算法
LMS	Least Mean Square	最小均方
LMST	Local Minimum Spanning Tree	基于本地最小生成树结构
LSBFSLL	Least Squares Best Fit Straight Line Linearity	最小二乘最佳拟合直线线性度
LSLR	Least Squares Linear Regression	最小平方的线性回归
LSM	Least Squares Method	最小二乘法
LTS	Lightweight Tree-based Synchronization	基于树的轻量级同步
MAC	Media Access Control	媒体访问控制
MCDS	Minimum Connected Dominating Set	最小连通支配集
MECN	Minimum Energy Communication Networks	最小能量通信网络
MEMS	Micro Electronic Mechanical System	微电子机械系统
MEMT	Micro Electronic Mechanical Technology	微电子机械技术
ML	Maximum Likelihood	最大似然
MMSE	Minimum Mean Square Error	最小均方误差
MMSPEED	Multi-path Multi-SPEED	多通道多速率
MRF	Markov Random Field	马尔科夫随机域模型
MSE	Mean Square Error	均方误差
MST	Minimum Spanning Tree	最小生成树
NLOS	None Line of Sight	非视距
NTP	Network Time Protocol	网络时间协议
OSI	Open System Interconnect	开放式系统互连网络参考模型
PEGASIS	Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems	传感器系统有效功耗采集
PM	Power Management	功耗管理
PSFQ	Pump Slowly, Fetch Quickly	快取慢存



RBP	Reliable Broadcast Protocol	可靠广播协议
RBS	Reference Broadcast Synchronization	参考广播同步
RCRT	Rate-Controlled Reliable Transport	速率控制的可靠传输
RDAT	Reliable Data Aggregation and Transmission	可靠数据融合和传输
ReInForM	REliable INformation FORwarding using Multiple paths	可靠多路径信息转发
REMBASS	REmotely Monitories Battle Area Sensors System	远程战场监视传感器系统
RMST	Reliable Multi-Segment Transport	可靠多段传输
RNG	Relative Neighborhood Graph	可靠领域图
RSS	Received Signal Strength	接收信号强度
SAD	Sum of Absolute Differences	残差绝对值之和
SAR	Sequential Assignment Routing	有序分配路由
SCM	Storage Class Memory	存储级内存
SDM	Simultaneous Distance Modification	距离改变量相同
SDS-TWR	Symmetric Double-Sided Two-Way Ranging	对称双边双向测距技术
SELDA	SEcure and ReLIable Data Aggregation	安全可靠数据融合
SMECH	Small MECH	小型微机械
SNEP	Secure Network Encryption Protocol	网络安全加密协议
SNGF	Stateless Nondeterministic Geographic Forwarding	无状态的不确定性的地理转发
SoC	System on Chip	片上系统
SOSUS	SOund SURveillance System	声音监测系统
SPAN	Self Powered Adhoc Networks	自供电地面传感器
SPIN	Sensor Protocol for Information via Negotiation	基于协商的路由协议
SQL	Structure Query Language	结构化查询语言
SSD	Sum of Squared Difference	差的平方和
SSW	Smart Sensor Web	灵巧传感器网络
STCP	Sensor Transmission Control Protocol	传感器传输控制协议
STEM	Sparse Topology and Energy Management	稀疏拓扑和能量管理
TAV	Total Asset Visibility	全资产可视化
TDMA	Time Division Multiple Access	时分复用

---

TDOA	Time Differential of Arriva	基于到达时间差
TEEN	Threshold sensitive Energy Efficient sensor Networks protocol	阈值敏感的能量高效传感器网 络协议
TOA	Time of Arrival	基于到达时间
TopDisc	Topology Discovery	拓扑发现
TPSN	Timing-Sync Protocol for Sensor Networks	传感器网络定时同步
LBTSync	Lightweight Bidirectional Time Synchronization	轻量级双信道时间同步
TTDD	Two-Tier Data Dissemination	双层数据传输
UGS	Unattended Ground Sensors	无人值守的地面传感器系统
USN	Ubiquitous Sensor Network	泛在无线传感器网络
uTESLA	micro Timed Efficeient Streaming Loss- tolerant Authentication protocal	基于时间的高效的容忍丢包的 流认证协议
VBS	Virtual BattleSpace	虚拟战场
WDA	Witness-based approach for Data fusion Assurance	基于证人的数据融合保真方法
WPSM	Warfighter Physiologic Status Monitoring	单兵生命体征监测系统
WSN	Wireless Sensor Network	无线传感器网络
WVMF	Weighted Vecotr Median Filter	加权矢量中值滤波
WVSS	Wireless Vital Signs System	无线生命体征监护系统
WZC	Wyner—Ziv Coding	维纳齐夫编码

# REFERENCE



- [1] 周贤伟. 无线传感器网络与安全[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [2] 张西红. 无线传感网技术及其军事应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [3] 谷有臣, 孔英. 传感器技术的发展和趋势综述[J]. 物理实验, 2002,22(12):40-42.
- [4] 于海斌, 曾鹏. 智能无线传感器网络系统[M]. 北京: 科学出版社, 2006:1-5.
- [5] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003.1:1283-1291.
- [6] 孙利民, 李建中, 陈渝. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [7] 徐平平, 刘昊, 褚宏云, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [8] 郑军, 张宝贤. 无线传感器网络技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [9] 蓝羽石, 于辉, 蒋飞, 等. 物联网军事应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [10] 陈林星. 无线传感器网络技术与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [11] 孙勇, 景博, 张宗麟, 等. 分簇路由的无线传感器网络通信模式与能量有效性研究[J]. 电子与信息学报, 2007.9:2262-2264.
- [12] 史琐, 刘增基, 盛敏. 一种高效的分布式 QoS 路由算法的研究[J]. 电子与信息学报, 2005.4:634-63.
- [13] 李晓维. 无线传感器网络技术[M]. 第 1 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- [14] 黄海平, 等. 无线传感器网络技术及其应用[M]. 第 1 版. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [15] 谷春江, 徐朝农, 张浩, 等. 无线传感器网络的广播时间同步算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006.9:1432-1437.
- [16] 徐朝农, 赵磊, 徐勇军, 等. 无线传感器网络时间同步协议的改进策略[J]. 计算机学报, 2007:514-523.
- [17] 肖琳, 程利娟, 王福豹. 一种低功耗无线传感器网络时间同步算法[J]. 计算机研究与发展, 2008,45(1):126-130.
- [18] 马祖长, 孙怡宁, 梅涛. 无线传感器网络综述[J]. 通信学报, 2004, 25(4):114-127.
- [19] 李建中, 高宏. 无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2008,45(1):1-15.
- [20] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003,14(7):1282-1291.
- [21] 崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 等. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展,

- 2005,42(1):163-174.
- [22] 杨宗凯, 赵大胜, 王玉明, 等. 无线传感器网络时钟同步算法综述[J]. 计算机应用, 2005,(5):1172-1176.
- [23] 康冠林, 王福豹, 段渭军. 无线传感器网络时间同步综述[J]. 计算机测量与控制, 2005,12(10):1021-1023.
- [24] 徐朝农, 徐勇军, 李晓维, 等. 无线传感器网络时间同步新技术[J]. 计算机研究与发展, 2008,45(1):138-145.
- [25] 乐世成, 王培康. 无线传感器网络中的节能路由算法[J]. 计算机工程, 2008,34(7):113-117.
- [26] 谢茂涛, 王晓立. 基于负载均衡的簇间路由协议[J]. 计算机应用, 2009,29(8):2188-2190.
- [27] 江海峰, 钱建生, 李世银, 等. 簇头负载均衡的无线传感器网络分簇路由协议[J]. 计算机工程与应用, 2010,46(23):111-114.
- [28] 陈维克, 李文锋, 首珩, 等. 基于 RSSI 的无线传感器网络加权质心定位算法 [J]. 武汉理工大学学报, 2006,30(2):265-268.
- [29] 刘运杰, 金明录, 崔承毅. 基于 RSSI 的无线传感器网络修正加权质心定位算法 [J]. 传感技术学报, 2010,23(5):717-721.
- [30] 何艳丽. 无线传感器网络质心定位算法研究 [J]. 计算机仿真, 2011,28(5):163-166.
- [31] 苏忠, 林闯, 封富君, 等. 无线传感器网络密钥管理的方案和协议[J]. 软件学报, 2007,18(5):1218-1231.
- [32] 裴庆祺, 沈玉龙, 马建峰. 无线传感器网络安全技术综述[J]. 通信学报, 2007,28(8):113-122.
- [33] 郎为民, 杨宗凯, 吴世忠, 等. 无线传感器网络安全研究[J]. 计算机科学, 2005,32(5):54-58.
- [34] 彭绍亮, 李姗姗, 彭宇行, 等. 无线传感器网络中一种实时高效的数据存储和查询方法[J]. 通信学报.2008,29(11):128-138.
- [35] 胡曦明, 董淑福, 王晓东, 等. 无线传感器网络的军事应用模式研究进展[J]. 传感器与微系统, 2010(3):102.
- [36] 肖健, 吕爱琴, 陈吉忠, 等. 无线传感器网络技术中的关键性问题[J]. 传感器世界, 2004,7:14-18.
- [37] 曾鹏, 于海斌, 梁英, 等. 分布式无线传感器网体系结构及应用支撑技术研究[J]. 信息与控制, 2004,33(3):37-43.
- [38] 韩鸿泉, 朱红松, 孟军. 无线传感网络技术[J]. 计算机系统应用, 2005,2:38-41.

- [39] 李钊, 韦玮. 无线传感器网络及关键技术综述[J]. 空间电子技术, 2006 年增刊:23-28.
- [40] 孙雨耕, 张静, 孙永进, 等. 无线自组传感器网络[J]. 传感技术学报, 2004(2).
- [41] 蒋鹏, 宋华华. 基于动态分簇路由优化和分布式粒子滤波的传感器网络目标跟踪方法[J]. 电子与信息学报, 2012,34(9):2187-2193.
- [42] 田浩, 韩屏. 基于分布式数据融合的无线移动传感器网络目标跟踪算法[J]. 计算机应用研究, 2011,28(7):2664-2669.
- [43] 蒋文涛, 孙利民, 吕俊伟, 等. 传感器网络中基于局部信号重建的目标计数算法[J]. 通信学报.2012,33(9):44-52.
- [44] 胡罡, 叶湘滨, 陈利虎. “智能尘埃”的体系结构与关键技术[J]. 传感器世界, 2004,(1):17220.
- [45] 高峰, 万晓冬. 全局效用启发式网格元任务调度策略[J]. 计算机工程, 2010,36(1):82-84.
- [46] 杨林峰, 李捷, 李陶深, 等. 面向服务的计算网格中间件的实现及性能测试[J]. 计算机工程, 2009,35(3):268-270.
- [47] 杨小军, 刑科义, 施坤林, 等. 传感器网络下机动目标动态协同跟踪算法[J]. 自动化学报, 2007,33(10):1029-1035.
- [48] 樊浩, 黄树彩, 高美凤, 等. 多传感器交叉提示多目标探测动态联盟技术研究[J]. 宇航学报, 2011,32(11):2380-2386.
- [49] 樊浩, 黄树彩, 韦道知, 等. 多传感器交叉提示技术若干问题[J]. 电光与控制, 2012,11(11):47-53.
- [50] 王泽毅. 多传感器协同目标跟踪方法研究[D]. 西安电子科技大学, 2011.
- [51] 黄月, 吴成东, 张云洲, 等. 基于移动节点的无线传感器网络覆盖优化[J]. 东北大学学报, 2012,33(2):165-168.
- [52] 莫磊, 胥布工. 无线传感器网络目标跟踪平台协同调度的实现[J]. 系统工程与电子技术, 2011,33(5):1129-1134.
- [53] 刘兆广. H.264 视频转码技术及可分级编码技术的研究[D]. 山东大学, 2008.
- [54] 桑圣洁. 基于 H.264/AVC 扩展可分级编码的优化研究[D]. 大庆石油学院, 2009.
- [55] 张金荣. 基于分布式编码的图像视频编码关键技术研究[D]. 中国科学技术大学, 2009.
- [56] 吕慧. 基于分布式多视点视频编码的边信息生成[D]. 上海交通大学, 2008.
- [57] 郭宜. 可伸缩视频编码的差错控制方法研究[D]. 中国科学技术大学, 2009.
- [58] 刘丹. 小波域视频帧内帧差图像可分级编码研究[D]. 中国科学技术大学, 2007.
- [59] A D Amis, R Prakash, T H P Vuong. MaxMin d-cluster formation in wireless ad hoc

- networks. In INFOCOM, 1999: 32-41.
- [60] M Kubisch, H Karl, A Wolisz, et al. Distributed algorithm for transmission power control in wireless sensor networks. In Proc. of IEEE WCNC 2003. New Orleans, 2003:16-20.
- [61] S Narayanaswamy, V Kawadia, R S Sreenivas, et al. Power control in Ad-hoc networks: theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol. In proceeding of European wireless conference, 2002:156-162.
- [62] N Li, J C Hou. Topology control in heterogeneous wireless networks: problems and solutions. In proceeding of INFOCOM, 2004:232-243.
- [63] B Deb, S Bhatnagar, B Nath. A topology discovery algorithm for sensor networks with application to network management. DCS Technical Report DCS-TR-441, Rutgers University, 2001.
- [64] O Younis, S Fahmy. Heed: A hybrid energy-efficient distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks. IEEE trans. on mobile computing, 2004, 3(4):660-669.
- [65] C Schurgers, V Tsiatsis, S Ganeriwal, et al. Topology management for sensor networks: Exploiting latency and density. In: pro 3rd ACM Symp on Mobile ad hoc networking&computing, 2002:135-145.
- [66] A Cerpa, D Estrin. ASCENT: Adaptive self-configuring sensor networks topologies. INFOCOM, 2002.
- [67] B Chen, K Jamieson, H Balakrishnan, et al. Span: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. Wireless Networks, 2002,8(5):481-494.
- [68] K Vikas, P R Kumar. Power control and clustering in ad hoc networks. In INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies, 2003, 1(1):459-469.
- [69] B Sundararaman, U Buy, A D Kshemkalyani. Clock Synchronization in Wireless Sensor Network: A Survey[J]. Ad-Hoc Networks, 2005, 3(3):281-323.
- [70] Elson J, Romer K. Wireless sensor network: a new regime for time synchronization[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2003, 33(1):149-154.
- [71] W Ye, J Heidemann, D Estrin. An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In INFOCOM 2002, 2002:1567-1576.
- [72] W Ye, J Heidemann, D Estrin. Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004,

- 12(3):493-506.
- [73] T V Dam, K Langendoen. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In proceedings of ACM SENSYS'03, 2003:171-180.
- [74] A El-Hoiydi, J D Decotignie. WiseMAC: an ultra-low power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks. In proceedings of the International Symposium on Computers and Communications, 2004:244-251.
- [75] K Jamieson, H Balakrishnan, Tay Y C. Sift: a MAC protocol for event-driven wireless sensor networks. In proceedings of EWSN'06, 2006:260-275.
- [76] V Rajendran, J J Garcia-luna-Aceves, K Obraczka. Energy-efficient channel access scheduling for power-constrained networks. In proceeding of the 5th international symposium on wireless personal multimedia communications, 2002:509-513.
- [77] V Rajendran, K Obraczka, J J Garcia-luna-Aceves. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. Proceeding ACM SenSys 03, 2003:181-192.
- [78] G Lu, B Krishnamachari, C S Raghavendra. An adaptive energy efficient and low-latency MAC for data gathering in wireless sensor networks. Proceedings of 18th international parallel and distributed processing symposium, 2004:26-30.
- [79] I Rhee, A Warrier, M Aia, et al. Z-MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks. In Proceedings of ACM SenSys05, 2005:90-101.
- [80] I Rhee, A Warrier, L Xu. Randomized dining philosophers to TDMA scheduling in wireless sensor networks. Technical report, Computer Science Department, North Carolina State University, 2004.
- [81] G S Ahn, E Miluzzo, A T Campbell, et al. Funneling-MAC: A localized, Sink-orient MAC for boosting fidelity in sensor networks. In proceeding of ACM conference on embedded networked sensor networks, 2006(11):293-306.
- [82] IEEE 802 Working Group. Standard for part 15.4: Wireless medium access control and physical layer specifications for low-rate wireless personal area networks. IEEE std.802.15.4, 2006:1-203.
- [83] W Heinzelman, J Kulik, H Balakrishnan. Adaptive protocol for information dissemination in wireless sensor networks. In: Proc. 5th ACM/IEEE Mobicom, 1999:174-185.
- [84] C Intanagonwiwat, R Govindan, D Estrin. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In Proc. ACM Mobicom2000, 2000:56-67.
- [85] W R Heinzelman, A Chandrakasan, H Balakrishnan. An application-specific protocol

- architecture for wireless microsensor networks. IEEE Transactions on wireless communication, 2002, 1(4):660-670.
- [86] S Lindsey, C S Raghavendra. PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information systems. Proceeding of IEEE aerospace conference, Big Sky, 2002(3):1125-1130.
- [87] Y Xu, J Heidemann, D Estrin. Geography-informed energy conservation for Ad hoc routing. In ACM SIGMOBILE, 2001:70-84.
- [88] Y Yu, Ramesh Govindan, Deborah Estrin. Geographical and energy aware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor network. UCLA computer science department technical report, Tech Rep:2001.
- [89] B Deb, S Bhatnagar. ReInForM: reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks, 28th Annual IEEE conference on Local Computer Networks, Germany, 2003:406-415.
- [90] H Tian, J A Stankovic, C Y Lu, et al. A spatiotemporal communication protocol for wireless sensor networks. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2005, 16(10): 995-1006.
- [91] Y C Wan, S B Eisenman, A T Campbell. CODA: congestion detection and avoidance in sensor networks. In SenSys'03, USA, 2003:266-279.
- [92] Y C Wan, S B Eisenman, A T Campbell. Siphon: overload traffic management using multi-radio virtual Sinks in sensor networks. In SenSys'05, 2006(11):96-105.
- [93] C Y Wan, A T Campbell, L Krishnamurthy. PSFQ: a reliable transport protocol for wireless sensor networks. ACM WSNA'02, 2002(9):1-11.
- [94] F Stann, J Heidemann. RMST: reliable data transport in sensor networks. In proceeding of first international workshop on sensor net protocols and applications. 2003(5): 102-112.
- [95] Y G Iyer, S Gandham, S Venkatesan. STCP: a generic transport layer protocol for wireless sensor networks. ICCCN'05, 2005(10):449-454.
- [96] J Peak, R Govindan. RECT: rate-controlled reliable transport for wireless sensor networks. ACM SenSys'07, 2007(1):305-319.
- [97] Li N, Hou J C, Sha L. Design and analysis of an MST-based topology control algorithm. In: Proc. of Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFORCOM 200). Sanfrancisco, IEEE Press, 2003. 1702-1712.
- [98] Li L, Halpern J Y, Bahl P, et al. Analysis of a cone-based distributed topology control



- algorithm for wireless multi-hop networks. Proc. of ACM Symp. on Principles of Distributed Computing, Newport, RI: ACM Press, 2001:264-273.
- [99] Rodoplu V, Meng T H. Minimum energy mobile wireless networks. Selected Areas in Communications, 1999, 17 (8):1333-1344.
- [100] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [101] Xu Y, Heidemann J, Est rin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In: Proc. of the 7t h Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy: ACM Press, 2001. 70-84.
- [102] Deb B, Bhat nagar S, Nat h B. A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management. <http://at hos. rutgers.edu/dataman/papers/TopDisc.pdf>. 2001-5/2006-3.
- [103] Kawadia V, Kumar P. Power control and clustering in ad hoc networks. In: Proc. of IEEE Inforcom. San Francisco, CA: IEEE Press, 2003. 459-469.
- [104] Dai F, Wu J. On constructing k-connected k-dominating set in wireless Ad Hoc and sensor networks. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2006, 66(7): 947-958.
- [105] Wan P J, et al. Distributed construction of connected dominating set in wireless Ad Hoc networks. Mobile Networks and Applications, 2004, 9(2): 141-149.
- [106] Shang W P, et al. On minimum m-connected k-dominating set problem in unit disk graphs. Journal of Combinatorial Optimization, 2008, 16(2): 99-106.
- [107] Thai M T, et al. Connected dominating sets in wireless networks with different transmission ranges. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(7): 721-730.
- [108] Thai M T, et al. On approximation algorithms of k-connected m-dominating sets in disk graphs. Theoretical Computer Science, 2007, 358(1-3): 49-59.
- [109] Capkun S, Hamdi M, Hubaux J P. GPS-Free Positioning in Mobile Ad-Hoc Networks. Cluster Computing, 2002, 5(2): 157-167.
- [110] Ziguo Zhong, Tian He. Achieving Range-Free Localization beyond Connectivity. Proceedings of the 7th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2009: 281-294.
- [111] Liu H, Darabi H, Banerjee P, et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2007, 37(6):1067-1080.
- [112] Yeh ShengCheng, Hsu WuHsiao, Su MingYang, et al. A study on outdoor positioning

- technology using GPS and WiFi networks. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2009:597-601.
- [113] Ciurana M, Barcelo-Arroyo F, Cugno S. Tracking mobile targets indoors using wlan and time of arrival. *Computer Communications*, 2009, 32(13):1552-1558.
- [114] Sayrafian Pour K, Kaspar. Indoor positioning using spatial power spectrum. *IEEE Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Germany, 2005:2722- 2726.
- [115] J Rantakokko, J Rydell, P Stromback, et al. Accurate and reliable soldier and first responder indoor positioning: multisensor systems and cooperative localization, *Wireless Communications*, IEEE, 2011, 18(2):10-18.
- [116] A Ribeiro, I Schizas, S Roumeliotis, et al. Kalman Filtering in Wireless Sensor Networks, *Control Systems Magazine*, IEEE, 2010, 30(2): 66–86.
- [117] Yubin Zhao, Marcel Kyas. Comparing Centralized Kalman Filter schemes for indoor positioning in wireless sensor network, *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2011 International Conference on, 2011: 21-23.
- [118] IEEE 802.15.4a-2007, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-rate Wireless Personal Area Networks (LRWPANs): Amendment to Add Alternative PHY, August 2007.
- [119] Jie Wang, Qinghua Gao, Yan Yu, et al. Toward Robust Indoor Localization Based on Bayesian Filter Using Chirp-Spread-Spectrum Ranging, *Industrial Electronics*, IEEE Transactions on, 2010, 59(3): 1622-1629.
- [120] Daegun Oh, Myungkyun Kwak, Jong-Wha Chong. A Subspace-Based Two-Way Ranging System Using a Chip Spread Spectrum Modem, Robust to Frequency Offset, *Wireless Communications*, IEEE Transactions on, 2012, 11(4): 1478-1487.
- [121] S Marano, W M Gifford, H Wymeersch, et al. NLOS identification and mitigation for localization based on UWB experimental data, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2010, 28(7): 1026–1035.
- [122] M Nicoli, C Morelli, V Rampa. A jump Markov particle filter for localization of moving terminals in multipath indoor scenarios, *IEEE Trans. Signal Process.*, 2008, 56(8): 3801–3809.
- [123] U Hammes, A M Zoubir. Robust mobile terminal tracking in NLOS environments based on data association, *IEEE Trans. Signal Process.*, 2010, 58(11): 5872–5882.
- [124] S Venkatesh, R M Buehrer. NLOS mitigation using linear programming in

- ultrawideband location-aware networks, IEEE Trans.Veh. Technol., 2007, 56(5): 3182-3198.
- [125] Y Baryshnikov, R Ghrist. Target enumeration via euler characteristic integrals[J]. In SIAM Journal on Applied Mathematics, 2009, 70: 825–844.
- [126] K Panta, D E Clark, B-N. Data association and track management for the Gaussian mixture probability hypothesis density filter [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3):1003–1016.
- [127] Zhu M, Ding S, Wu Q, et al. Fusion of threshold rules for target detection in wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2010, 6(18):1–7.
- [128] Feng C, Valaee S, Tan Z. Multiple Target Localization Using Compressive Sensing[C]. In IEEE Global Telecommunications Conference, 2009:1–6.
- [129] Bowu Zhang, Xiuzhen Cheng, Nan Zhang, et al. Sparse target counting and localization in sensor networks based on compressive sensing[C], IEEE Infocom, 2011:2255-2263.
- [130] Anthea Wain Sy Au, Chen Feng, et al. Indoor tracking and navigation using received signal strength and compressive sensing on a mobile device [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012,99(12):12-19.
- [131] Shahrokh F, Georgios B, et al. Tracking target signal strengths on a grid using sparsity[C]. Proceedings of the 14th International Conference on Information Fusion, 2011:1-6.
- [132] Candes E J, Romberg. Sparsity and incoherence in compressive sensing [J]. Inverse Problems, 2007, 23(3):969-985.
- [133] Malioutov D, Cetin M, Willsky A S. A sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005,53(8): 3010-3022.
- [134] Y Mostofi, P Sen. Compressive cooperative sensing and mapping in mobile networks[C]. In ACC'09 Proceedings of the 2009 conference on American Control Conference, 2009:3397–3404.
- [135] Ji S. Xue Y. Carin L. Bayesian compressive Sensing. IEEE Transaction Signal Processing[J], 2008, 56(6):2346-2356.
- [136] Candes E, Tao T. Near optimal signal recovery from random projection: Universal encoding strategies [J]. IEEE Trans. On Information Theory, 2006, 52(12):5406-5425.
- [137] Candes E J, Wakin M B. An introduction to compressive sampling [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2):21-30.

- [138] Needell D, Vershynin R. Greedy signal recovery and uncertainty principles[C]. Computational Imaging VISPIE 19th Annual Symposium, 2008:61-66.
- [139] Needell D, Tropp J. CosaMP: iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2008,26:301-321.
- [140] Katenka N, Levina E, Michailidis G. Tracking multiple targets using binary decisions from wireless sensor networks[C]. In Globecom, 2008:1-21.
- [141] Y Guo, B Hua, L Yue. Energy-based target numeration in wireless sensor networks[C]. In FGCN '07: Proceedings of the Future Generation Communication and Networking, 2007: 380–385.
- [142] Lin Jian-yong, Xiao Wen-dong, et al. Energy-efficient distributed adaptive multi-sensor scheduling for target tracking in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009,58(6):1886-1896.
- [143] Oka A, Lampe L. Distributed target tracking using signal strength measurements by a wireless sensor network [J]. IEEE Journal on Selected Areas in communications, 2010,28(7):1006-1015.